

山西恒曲中条山铜尾矿自然定居植物群落优势种种间关系与生态位

韩锦涛¹, 李素清^{2*}

(1. 山西体育职业学院, 山西 太原 030006; 2. 山西大学黄土高原研究所, 山西 太原 030006)

摘要:【目的】筛选适合铜尾矿植物修复的先锋植物及配置模式。【方法】本研究在实地调查的基础上,采用方差比率、Godron群落稳定性、种间联结性与相关性、生态位指数测度方法,研究山西中条山铜尾矿植物群落优势种种间关系与生态位特征。【结果】16个优势种的120个种对中,70%以上种对呈不显著相关,说明该铜尾矿植物群落结构不稳定;优势种的生态位重叠值 O_{ik} 与共同出现百分率 PC 值、Spearman秩相关系数之间均呈显著正相关($P < 0.05$),且Spearman秩相关系数的拟合效果优于 PC 值。优势种对荆条与白刺花或臭椿,白刺花与刺槐,臭椿与刺槐间呈极显著正相关。【结论】这些种对的 PC 值较大、 O_{ik} 值较小,耐旱、耐贫瘠、抗污染、生态适应能力强,可推荐为当地铜尾矿植被修复的最佳先锋物种与混种模式。

关键词:铜尾矿;优势种;种间关系;生态位;中条山

中图分类号:Q948 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)03-0134-10

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2024.03.017



铜尾矿是铜矿开采和冶炼过程中产生的大量未经处理的矿业废料堆积而成的废弃地,其生境恶劣、重金属含量高,土壤水分、养分贫瘠,植被的自然定居十分困难^[1]。铜尾矿的长期大量堆积,不仅侵占大量土地资源,而且因其物理结构不良,持水保肥能力差^[1],易加剧水土流失,引发次生地质灾害,带来巨大生态安全隐患,亟待进行生态修复。

物种联结性与相关性(简称种间关系)和生态位是植物群落的重要特征之一,对正确认识群落结构、功能具有重要指导意义,并可为植被修复提供科学依据^[2-3]。由于种间联结是以物种存在与否的二元定性

数据为依据,种间相关和生态位是以物种的数量数据为依据^[3],因此将定性与定量结合进行综合分析,可以更客观地揭示种间关系与资源利用特征。近年来,我国学者相继开展了大量的种间关系与生态位研究^[4],但针对铜尾矿自然定居植物种间关系与生态位的研究缺乏,已有的研究主要集中在铜尾矿植被调查^[5]、优势植物重金属富集^[6-7]及基质理化性质变化^[8]等方面。

中条山有色金属集团有限公司于1956年成立^[9],位于山西省垣曲县境内^[10],长期高强度的铜业生产,形成大量铜尾矿,造成的土地退化、景观破坏及环境污染等问题亟待解决。铜尾矿生境恶劣,植被在自然条件下恢复极其缓慢,而人工植被是加速生态修复最为有效的方法。本研究通过研究该铜尾矿自然定居植物群落优势种种间关系与生态位特征,筛选适合其植被修复的先锋植物及配置模式,为该铜尾矿植被加速修复提供科学依据和技术支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于中条山铜矿峪尾矿、铜矿峪选厂尾

收稿日期:2023-04-10;**修回日期:**2023-05-30

基金资助:国家自然科学基金项目(41271531);太原市容环境卫生科学研究所研发项目(02050120120130);山西省国际合作项目(2012081010)

作者简介:韩锦涛(1976-),男,山西太原人,副教授,硕士,主要从事矿山植被恢复、生态地理学、体育草坪等方面研究。E-mail:Hanjintao2005@163.com

*通信作者。E-mail:lisuqing@sxu.edu.cn

矿、恒河铜厂西尾矿和十八河尾矿,地理坐标介于 $35^{\circ}16.045' \sim 35^{\circ}21.560' N$, $111^{\circ}36.912' \sim 111^{\circ}40.666' E$,海拔高度介于595~863 m。该区属暖温带半干旱大陆性季风气候,地带性土壤类型为褐土,优势植物包括栓皮栎(*Quercus variabilis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、荆条(*Vitex negundo*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)等^[11]。

1.2 植被调查与优势种筛选

中条山铜矿经过50多年的铜矿开采和冶炼,在其矿区形成了多处堆积1~50年的铜尾矿,在这些铜

尾矿上已形成自然定居植物群落,处于乔灌草不同演替阶段。本研究在上述4个铜尾矿上,依据海拔和坡向,分别进行 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 、 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 、 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 乔木、灌木、草本植物样方调查,共计63个样方,包括12个郁闭度在45%以上的乔木样方,3个郁闭度在60%灌木样方和48个盖度在70%以上草本样方,共统计自然定居植物种类85种,包括乔木、灌木各7种,草本植物49种。依据植物种的重要值及频度^[3],从中选择16个优势种(表1),形成 63×16 的优势种重要值及其转化的0、1数据矩阵,进行种间关系和生态位特征分析。

表1 铜尾矿植物群落16个优势种特征

Table 1 Characteristics of 16 dominant species in the plant communities on copper mine tailings

| 序号 | 植物种 | 科 | 分布 | 水分生态类型 | 生活型 | 重要值/% |
|----|--|---------------------|---------|--------|-----|-------|
| 1 | 野艾蒿 <i>Artemisia lavandulaefolia</i> | 菊科 Compositae | a-c | 旱中生 | P | 8.94 |
| 2 | 茵陈蒿 <i>Artemisia capillaries</i> | 菊科 Compositae | a-d | 中旱生 | P | 3.61 |
| 3 | 铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i> | 菊科 Compositae | a, c, d | 中旱生 | P | 7.22 |
| 4 | 葎草 <i>Humulus japonicus</i> | 桑科 Moraceae | a, c, d | 中旱生 | P | 3.65 |
| 5 | 黄花蒿 <i>Artemisia annua</i> | 菊科 Compositae | a, c, d | 旱中生 | T | 2.17 |
| 6 | 狗尾草 <i>Setaria viridis</i> | 禾本科 Gramineae | a-d | 中生 | T | 10.73 |
| 7 | 甘野菊 <i>Chrysanthemum lavandulifolium</i> | 菊科 Compositae | a-c | 中生 | P | 6.28 |
| 8 | 灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i> | 藜科 Chenopodiaceae | a-d | 中生 | T | 4.84 |
| 9 | 反枝苋 <i>Amaranthus retroflexus</i> | 苋科 Amaranthaceae | a-d | 中生 | T | 2.70 |
| 10 | 马齿苋 <i>Portulaca oleracea</i> | 马齿苋科 Portulacaceae | b-d | 中生 | T | 4.87 |
| 11 | 灯心草蚤缀 <i>Arenaria juncea</i> | 石竹科 Caryophyllaceae | a, c | 中生 | P | 4.37 |
| 12 | 小果博落回 <i>Macleaya microcarpa</i> | 罂粟科 Papaveraceae | c | 中生 | P | 3.47 |
| 13 | 荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i> | 马鞭草科 Verbenaceae | a, d | 中生 | P | 11.98 |
| 14 | 白刺花 <i>Sophora viciifolia</i> | 豆科 Leguminosae | a, d | 中生 | P | 1.66 |
| 15 | 臭椿 <i>Ailanthus altissima</i> | 苦木科 Simaroubaceae | a, b | 中生 | P | 8.05 |
| 16 | 刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> | 豆科 Leguminosae | a-c | 中生 | P | 3.86 |

注:a 铜矿峪尾矿, b 铜矿峪选厂尾矿, c 恒河铜厂西尾矿, d 十八河尾矿, T 一年生, P 多年生。

1.3 数据分析方法

采用重要值(I_V)指标处理数据,计算乔木、灌木和草本植物重要值^[3]; χ^2 检验、联结系数(AC)和共同出现百分率(PC)分析物种联结性^[3];采用Pearson相关与Spearman秩相关分析物种相关性^[3,12-13];采用Shannon-Wiener指数、Pianka指数计算优势种的生态位宽度和重叠值^[3]。具体分析方法见表2。

2 结果与分析

2.1 种间联结性分析

2.1.1 χ^2 检验 从Yates校正后的 χ^2 检验结果(表3)可知,16个优势种的120个种对中,呈正相关种对76对(63.33%)、负相关种对44对(36.67%),正负关联

比(1.73)大于1,其中呈极显著、显著正相关种对(分别为16、8对)占比20.00%,如荆条与白刺花/臭椿/刺槐,白刺花与刺槐,臭椿与刺槐等种对;呈极显著、显著负相关种对(分别为3、4对)占比5.83%,而呈不显著正、负相关种对(分别为52、37对)占比74.17%。总体看,呈极显著、显著相关种对占比25.83%,说明大多数种对间联结性较弱。

2.1.2 AC与PC值分析 从图1可知,16个优势种的120个种对的AC值在 $[0.6, 1)$ 、 $[0.3, 0.6)$ 、 $(0, 0.3)$ 、 $[-0.3, 0)$ 、 $[-0.6, -0.3)$ 和 $[-1, -0.6]$ 的种对,分别占比1.67%(2对)、8.33%(10对)、52.50%(63对)、7.50%(9对)、9.17%(11对)和20.83%(25

表2 16个优势种的数据分析方法
Table 2 Data analysis methods for 16 dominant species

| 方法 | 公式 | 指标解释 |
|---------------------------------------|--|--|
| 植物种重要值(Iv)/% ^[3,14] | $Iv_{\text{平}} = (\text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{优势度})/3$ $Iv_{\text{盖}} = (\text{相对高度} + \text{相对盖度})/2$ $Iv_{\text{高}} = (\text{相对盖度} + \text{相对高度})/2$ | |
| Yates校正后的 χ^2 检验 ^[15] | $\chi^2 = \frac{n(ad - bc - 0.5n)^2}{(a+b)(b+d)(c+d)(a+c)}$ | 当 $\chi^2 > 6.635$,种间呈极显著相关;当 $3.841 < \chi^2 < 6.635$,种间呈显著相关 |
| 联结系数(AC) ^[16] | $AC = (ad - bc) / [(a+b)(b+d)]$ (当 $ad \geq bc$ 时) $AC = (ad - bc) / [(a+b)(a+c)]$ (当 $bc > ad, d \geq a$ 时) $AC = (ad - bc) / [(b+d)(d+c)]$ (当 $bc > ad, d(a)$ 时) | AC 值 $[-1, 1]$ 越接近1(或-1),种间正(或负)联结性越强; AC 值等于0,种间完全独立 |
| 共同出现百分率(PC) ^[16] | $PC = \frac{a}{a+b+c}$ | PC 值 $[0, 1]$ 越接近1,正联结越强; PC 值等于0,种间无关联 |
| 点相关系数(Φ) ^[17] | $\Phi = \frac{(ad - bc)}{\sqrt{(a+b)(a+c)(c+d)(b+d)}}$ | Φ 值 $[-1, 1]$ 越接近于1(或-1),种间正(或负)联结性越强 |
| Pearson相关检验 ^[3] | $r_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_i)(X_{kj} - \bar{X}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 \sum_{j=1}^n (X_{kj} - \bar{X}_k)^2}}$ | 种间相关性测定 |
| Spearman秩相关检验 ^[3] | $r(i, k) = 1 - \frac{6 \sum_{j=1}^n d_j^2}{n^3 - n}$ | 种间相关性测定 |
| Shannon-Wiener指数 ^[3] | $B_i = - \sum_{j=1}^r (P_{ij} \ln P_{ij})$ | 生态位宽度测定 |
| Pianka重叠指数 ^[3] | $O_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^r P_{ij} P_{kj}}{\sqrt{\left(\sum_{j=1}^r P_{ij}\right)^2 \left(\sum_{j=1}^r P_{kj}\right)^2}}$ | 生态位重叠测定 |

对);呈正联结种对75对、负联结种对45个,正负关联比(1.67)大于1;但60%的种对 AC 值在 $(-0.3, 0.3)$,仅22.50%的种对 AC 值在 $[0.6, 1)$ 或 $[-1, -0.6]$,如灰绿藜与反枝苋、白刺花与刺槐种对的 AC 值大于0.6,说明大多数种对间正联结性较弱。

120个种对的 PC 值均小于0.6,在 $[0.4, 0.6)$ 的种对(6对)占比5.00%,在 $[0.2, 0.4]$ 的种对(29对)占比24.17%。60.83%的种对(79对) PC 值在 $(0, 0.2)$, PC 值为0的种对(18对)占比15.00%,说明16个优势种对生境的需求不同,同时出现几率较小,大多数种间联结松散,各优势种分布具有一定的独立性。

2.1.3 Φ 系数分析 从点相关系数(Φ)结果表4可知,16个优势种的120个种对中,呈正联结种对75对(62.50%)、负联结种对45对(37.50%),正负关联比(1.67)大于1;其中呈正联结程度较强($\Phi \geq 0.5$)的种对4对(3.33%),包括灰绿藜与反枝苋、荆条与白刺

花/刺槐、臭椿与刺槐种对;呈负关联程度较强($\Phi < -0.5$)的种对0对;联结程度较弱($-0.3 \leq \Phi < 0.3$)的种对99对(82.50%),说明大多数种对间联结程度较弱,这与 AC 结果一致。

2.2 种间相关性分析

2.2.1 Pearson相关分析 从Pearson相关检验结果表5可知,16个优势种的120个种对中,呈正相关种对47对(39.17%)、负相关种对73对(60.83%),正负关联比(0.64)小于1。其中呈极显著、显著正相关种对(分别为5、8对)占比10.84%,如甘野菊与臭椿,灰绿藜与反枝苋,荆条与白刺花/臭椿/刺槐等种对;呈极显著、显著负相关种对(分别为0、5对)占比4.17%,而呈不显著相关种对(102对)占比84.99%,说明大多数优势种种间关联较弱。

2.2.2 Spearman秩相关分析 从Spearman秩相关检验结果表6可知,16个优势种的120个种对中,呈正

表 3 16 个优势种的 χ^2 检验
Table 3 χ^2 -test of 16 dominant species

| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|----|----------|---------|----------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|--------|--------|--------|----------|---------|----------|----|
| 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 5.600* | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 0.645 | 1.813 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 2.411 | -0.068 | 1.342 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | -9.646** | -2.178 | -3.740 | -2.667 | 1 | | | | | | | | | | | |
| 6 | 3.492 | 1.788 | 1.329 | 0.134 | -6.318* | 1 | | | | | | | | | | |
| 7 | 14.292** | 5.833* | 10.742** | 2.512 | -1.413 | 1.682 | 1 | | | | | | | | | |
| 8 | 0.238 | -2.009 | -1.740 | 0.547 | 0.547 | 1.164 | -0.802 | 1 | | | | | | | | |
| 9 | 0.194 | 0.785 | 1.095 | 0.536 | -0.390 | 2.751 | 0.808 | 25.580** | 1 | | | | | | | |
| 10 | -7.079** | 0.075 | -2.284 | -9.261** | 4.008* | -4.293* | 8.070** | 1.338 | 1.476 | 1 | | | | | | |
| 11 | -0.583 | -0.207 | 4.350* | 3.215 | 0.050 | -0.419 | 2.431 | -1.981 | 0.016 | -1.131 | 1 | | | | | |
| 12 | 13.263** | 0.074 | -0.358 | 4.196* | -2.864 | 0.007 | 1.535 | -1.251 | -1.724 | -2.258 | 0.031 | 1 | | | | |
| 13 | 2.333 | 7.467** | 4.350* | 1.017 | -4.534* | 5.634* | 9.085** | -0.178 | 3.635 | -1.131 | 0.540 | 0.031 | 1 | | | |
| 14 | 1.575 | 0.035 | -1.164 | -1.360 | -1.360 | 1.609 | 0.729 | -0.594 | -0.819 | -1.072 | -0.525 | -0.332 | 18.900** | 1 | | |
| 15 | 0.583 | 3.746 | 8.392** | 1.017 | -4.534* | 2.619 | 9.085** | 0.317 | 7.818** | -1.131 | -0.086 | -1.105 | 7.799** | 0.933 | 1 | |
| 16 | 2.009 | 0.788 | 7.895** | 2.722 | -3.401 | 1.475 | 5.906* | -0.015 | 2.375 | -2.681 | 1.313 | -0.829 | 21.000** | 9.844** | 21.000** | 1 |

注: *显著 ($P < 0.05$), **极显著 ($P < 0.01$); 序号所对应的物种见表 1, 下同。

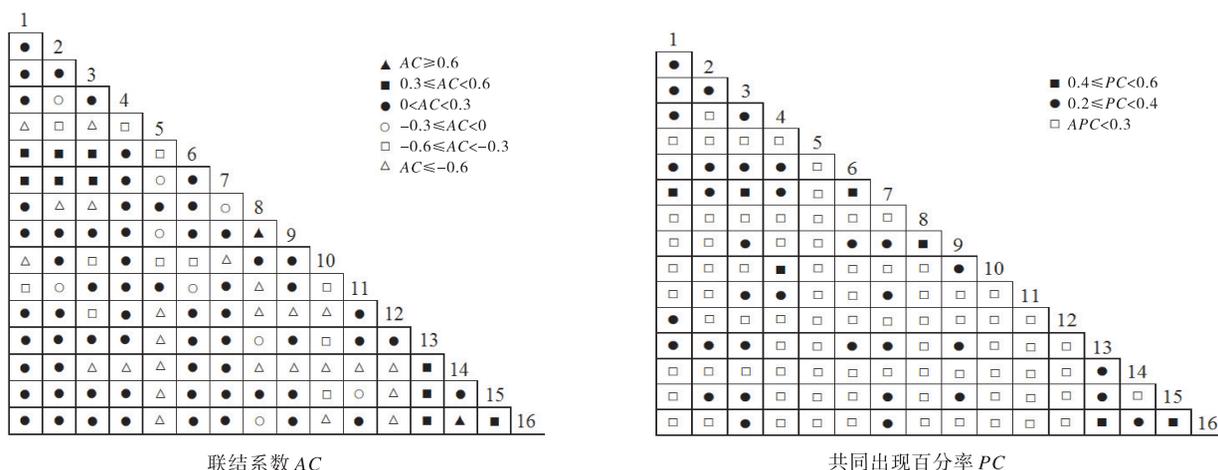


图 1 16 个优势种的联结系数 (AC) 与共同出现百分率 (PC)

Fig. 1 Association coefficient (AC) and co-occurrence percentage (PC) of 16 dominant species

相关种对 66 对 (55.00%)、负相关种对 54 对 (45.00%), 正负关联比 (1.22) 大于 1。其中呈极显著、显著正相关种对 (分别为 16、9 对) 占比 20.83%, 如野艾蒿与甘野菊/小果博落回, 茵陈蒿 (*A. capillaries*) 与甘野菊/荆条/臭椿, 甘野菊与臭椿/刺槐, 荆条与白刺花/臭椿/刺槐, 白刺花与刺槐, 臭椿与刺槐等种对; 呈极显著、显著负相关种对 (分别为 4、4 对) 占比 6.66%, 而呈不显著相关种对占比 72.50%, 说明大多数优势种种间关联较弱。

2.3 生态种组划分

由图 2 可知, 16 个优势种聚为两大生态种组, 组内各种对间多呈正相关, 对生境和资源的需求相似, 而组间各种对间则多呈负相关, 导致其分化的主导因子是铜尾矿堆积时间的差异。各组主要特征简述如下:

生态种组 I: 由优势种黄花蒿、马齿苋、灰绿藜、反枝苋、狗尾草组成, 它们为一年生、旱中生或中生草本植物, 耐旱、耐贫瘠、抗污染、适应性强, 分布于铜矿峪尾矿、铜矿峪选厂尾矿、恒河铜厂西尾矿和十八河尾矿

表4 16个优势种的点相关系数(Φ)Table 4 Point correlation coefficients (Φ) of 16 dominant species

| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|----|
| 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 0.298 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 0.101 | 0.170 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 0.196 | -0.033 | 0.146 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | -0.391 | -0.186 | -0.244 | -0.206 | 1 | | | | | | | | | | | |
| 6 | 0.235 | 0.168 | 0.145 | 0.046 | -0.317 | 1 | | | | | | | | | | |
| 7 | 0.476 | 0.304 | 0.413 | 0.200 | -0.150 | 0.163 | 1 | | | | | | | | | |
| 8 | 0.061 | -0.179 | -0.166 | 0.093 | 0.093 | 0.136 | -0.113 | 1 | | | | | | | | |
| 9 | 0.055 | 0.112 | 0.132 | 0.092 | -0.079 | 0.209 | 0.113 | 0.637 | 1 | | | | | | | |
| 10 | -0.335 | 0.035 | -0.190 | 0.248 | -0.195 | -0.261 | -0.358 | 0.146 | 0.153 | 1 | | | | | | |
| 11 | -0.096 | -0.057 | 0.263 | 0.226 | 0.028 | -0.082 | 0.196 | -0.177 | 0.016 | -0.134 | 1 | | | | | |
| 12 | 0.459 | 0.034 | -0.075 | 0.258 | -0.213 | 0.011 | 0.156 | -0.141 | -0.165 | -0.189 | 0.022 | 1 | | | | |
| 13 | 0.192 | 0.344 | 0.263 | 0.127 | -0.268 | 0.299 | 0.380 | -0.053 | 0.240 | -0.134 | 0.093 | 0.022 | 1 | | | |
| 14 | 0.158 | 0.024 | -0.136 | -0.147 | -0.147 | 0.164 | 0.108 | -0.097 | -0.114 | -0.130 | -0.091 | -0.073 | 0.548 | 1 | | |
| 15 | 0.096 | 0.244 | 0.365 | 0.127 | -0.268 | 0.204 | 0.380 | 0.071 | 0.352 | -0.134 | -0.037 | -0.132 | 0.352 | 0.122 | 1 | |
| 16 | 0.179 | 0.112 | 0.354 | 0.208 | -0.232 | 0.153 | 0.306 | -0.015 | 0.194 | -0.206 | 0.144 | -0.115 | 0.577 | 0.395 | 0.577 | 1 |

表5 16个优势种的Pearson相关系数

Table 5 Pearson's correlation coefficients of 16 dominant species

| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|----|---------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|-------|----|
| 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 0.228 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | -0.157 | 0.010 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 0.062 | -0.149 | 0.083 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | -0.243 | -0.112 | -0.181 | 0.136 | 1 | | | | | | | | | | | |
| 6 | -0.181 | -0.074 | -0.057 | -0.086 | -0.063 | 1 | | | | | | | | | | |
| 7 | 0.320* | 0.224 | 0.124 | 0.118 | -0.152 | -0.123 | 1 | | | | | | | | | |
| 8 | -0.090 | -0.177 | -0.169 | 0.047 | 0.013 | -0.028 | -0.214 | 1 | | | | | | | | |
| 9 | -0.139 | -0.086 | -0.112 | -0.020 | -0.057 | -0.123 | -0.139 | 0.311* | 1 | | | | | | | |
| 10 | -0.252* | -0.111 | -0.180 | -0.218 | 0.254* | 0.070 | -0.275* | 0.031 | 0.016 | 1 | | | | | | |
| 11 | -0.159 | -0.150 | 0.002 | -0.039 | 0.081 | -0.085 | 0.172 | -0.107 | -0.090 | -0.052 | 1 | | | | | |
| 12 | 0.469** | -0.029 | -0.103 | 0.117 | -0.143 | -0.175 | 0.040 | -0.112 | -0.098 | -0.133 | -0.054 | 1 | | | | |
| 13 | 0.132 | 0.291* | 0.209 | 0.085 | -0.175 | -0.042 | 0.172 | -0.114 | -0.038 | -0.156 | -0.100 | -0.014 | 1 | | | |
| 14 | 0.137 | 0.111 | -0.107 | -0.115 | -0.100 | 0.062 | 0.043 | -0.078 | -0.068 | -0.093 | -0.066 | -0.070 | 0.261* | 1 | | |
| 15 | -0.061 | 0.105 | 0.422** | 0.259* | -0.160 | -0.022 | 0.230 | -0.090 | -0.018 | -0.140 | -0.103 | -0.112 | 0.245 | -0.024 | 1 | |
| 16 | 0.042 | 0.185 | 0.169 | 0.189 | -0.119 | -0.021 | 0.108 | -0.071 | 0.024 | -0.110 | -0.052 | -0.083 | 0.655** | 0.067 | 0.115 | 1 |

注:* 差异显著($P < 0.05$), ** 差异极显著($P < 0.01$)。

堆积时间较短的地段,处于群落演替的初期阶段。

生态种组 II:由优势种荆条、刺槐、白刺花、葎草、灯心草蚤缀、野艾蒿、铁杆蒿、臭椿、甘野菊、茵陈蒿、小果博落回组成,它们为多年生、中旱生或中生乔、

灌、草本植物,生态幅宽、耐旱、耐贫瘠、抗污染、适应性强,分布于铜矿峪尾矿、铜矿峪选厂尾矿、恒河铜厂西尾矿和十八河尾矿堆积时间较长的地段,处于群落演替的中期阶段。

表 6 16 个优势种的 Spearman 秩相关系数

Table 6 Spearman's rank correlation coefficients of 16 dominant species

| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|----|----------|---------|---------|----------|---------|--------|----------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|----|
| 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 0.292* | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | -0.005 | 0.151 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 0.158 | -0.090 | 0.141 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | -0.368** | -0.154 | -0.242 | -0.116 | 1 | | | | | | | | | | | |
| 6 | -0.036 | 0.018 | 0.020 | -0.049 | -0.187 | 1 | | | | | | | | | | |
| 7 | 0.444** | 0.291* | 0.330** | 0.176 | -0.181 | -0.023 | 1 | | | | | | | | | |
| 8 | -0.014 | -0.174 | -0.195 | 0.124 | 0.059 | 0.073 | -0.157 | 1 | | | | | | | | |
| 9 | -0.042 | 0.067 | 0.065 | 0.106 | -0.075 | 0.037 | 0.015 | 0.639** | 1 | | | | | | | |
| 10 | -0.352** | -0.025 | -0.207 | -0.370** | 0.307* | -0.156 | -0.382** | 0.121 | 0.122 | 1 | | | | | | |
| 11 | -0.126 | -0.074 | 0.255* | 0.170 | 0.024 | -0.125 | 0.173 | -0.176 | -0.021 | -0.124 | 1 | | | | | |
| 12 | 0.501** | 0.008 | -0.084 | 0.228 | -0.208 | -0.186 | 0.108 | -0.140 | -0.164 | -0.186 | 0.019 | 1 | | | | |
| 13 | 0.184 | 0.336** | 0.272* | 0.117 | -0.262* | 0.120 | 0.310* | -0.061 | 0.211 | -0.152 | 0.074 | 0.017 | 1 | | | |
| 14 | 0.164 | 0.060 | -0.134 | -0.144 | -0.144 | 0.104 | 0.106 | -0.097 | -0.113 | -0.129 | -0.091 | -0.072 | 0.485** | 1 | | |
| 15 | 0.062 | 0.224 | 0.393** | 0.169 | -0.262* | 0.087 | 0.388** | 0.051 | 0.303* | -0.147 | -0.060 | -0.132 | 0.342** | 0.088 | 1 | |
| 16 | 0.159 | 0.153 | 0.333** | 0.226 | -0.227 | 0.077 | 0.283* | -0.027 | 0.182 | -0.203 | 0.132 | -0.114 | 0.592** | 0.372** | 0.532** | 1 |

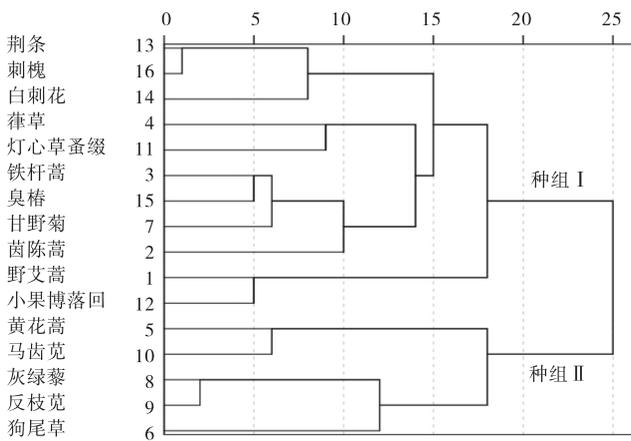


图 2 16 个优势种的 Spearman 秩相关系数聚类图

Fig. 2 The clustering diagram of Spearman's rank correlation coefficients of 16 dominant species

2.4 生态位宽度与重叠分析

由表 7 可知,120 个种对中, B_i 介于 0.661~6.920, 其中 B_i 最大的是刺槐(6.920)和臭椿(6.724), 说明这 2 个优势种在铜尾矿上的抗逆性和资源利用能力较强, 在群落中占据优势地位; O_{ik} 介于 0~0.683, 68.3% 的种对(82 对) O_{ik} 值介于 0~0.3, 16.7% 的种对(20 对) O_{ik} 值为 0, 其中 O_{ik} 值最大的是荆条和刺槐(0.683), 野艾蒿与甘野菊(0.515)/小果博落回(0.538)的 O_{ik} 值也较大, 说明这些优势种在资源利用方式上具有一定的相似性。

2.5 生态位重叠与种间关系的回归分析

由图 3 可知,16 个优势种的生态位重叠(O_{ik})与共同出现百分率(PC)、Spearman 秩相关系数之间均呈显著正相关($P < 0.001$), PC 与 O_{ik} 值的回归方程为 $y = -0.447x^2 + 1.124x - 0.006$ ($R^2 = 0.622$, $P < 0.001$), Spearman 秩相关系数与 O_{ik} 值的回归方程为 $y = 0.308x^2 + 0.475x + 0.111$ ($R^2 = 0.617$, $P < 0.005$); Spearman 秩相关系数与 O_{ik} 值的相关指数 R^2 较高, 拟合效果优于 PC 值。

3 讨论

3.1 种间联结性与相关性结果基本一致, Spearman 秩相关分析灵敏度高

16 个优势种的 120 个种对中, χ^2 检验、 AC 、 Φ 、Spearman 秩相关系数的正负关联比(分别为 1.73、1.67、1.67 和 1.22)均大于 Pearson 相关系数的正负关联比(0.64); 呈正相关种对占优势, 但 70% 以上种对呈不显著相关; 80% 以上种对 PC 值介于 0~0.4, 呈极显著、显著相关种对较少, 说明 16 个优势种种间联结松散, 群落结构不稳定, 处于演替的初、中期阶段, 这与 Bradshaw^[17]关于“在矿区恶劣生境上自然定居植物群落演替缓慢”的研究结果一致。

由表 8 可知, 呈极显著、显著相关种对排序由多到

表7 16个优势种的生态位宽度及生态位重叠指数
Table 7 Niche breathe and overlap of 16 dominant species

| 序号 | 生态位宽度 (B_i) | 生态位重叠(O_{ik}) | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 1 | 5.590 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 1.272 | 0.414 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 5.263 | 0.106 | 0.212 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 1.339 | 0.286 | 0.098 | 0.268 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 0.661 | 0.024 | 0.102 | 0.031 | 0.300 | 1 | | | | | | | | | | | |
| 6 | 6.558 | 0.199 | 0.237 | 0.230 | 0.225 | 0.210 | 1 | | | | | | | | | | |
| 7 | 2.597 | 0.515 | 0.423 | 0.335 | 0.343 | 0.113 | 0.262 | 1 | | | | | | | | | |
| 8 | 4.132 | 0.101 | 0.009 | 0.003 | 0.194 | 0.149 | 0.186 | 0.017 | 1 | | | | | | | | |
| 9 | 1.689 | 0.040 | 0.065 | 0.032 | 0.119 | 0.072 | 0.090 | 0.053 | 0.378 | 1 | | | | | | | |
| 10 | 2.949 | 0.002 | 0.090 | 0.020 | 0.000 | 0.373 | 0.290 | 0.004 | 0.157 | 0.128 | 1 | | | | | | |
| 11 | 5.615 | 0.019 | 0.007 | 0.127 | 0.100 | 0.189 | 0.114 | 0.296 | 0.000 | 0.002 | 0.066 | 1 | | | | | |
| 12 | 2.315 | 0.538 | 0.117 | 0.044 | 0.238 | 0.000 | 0.055 | 0.199 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.038 | 1 | | | | |
| 13 | 3.775 | 0.292 | 0.408 | 0.333 | 0.236 | 0.000 | 0.192 | 0.333 | 0.021 | 0.073 | 0.005 | 0.015 | 0.096 | 1 | | | |
| 14 | 1.021 | 0.226 | 0.196 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.181 | 0.154 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.315 | 1 | | |
| 15 | 6.724 | 0.123 | 0.243 | 0.504 | 0.370 | 0.000 | 0.189 | 0.365 | 0.032 | 0.082 | 0.008 | 0.003 | 0.000 | 0.335 | 0.050 | 1 | |
| 16 | 6.920 | 0.166 | 0.277 | 0.258 | 0.280 | 0.000 | 0.141 | 0.228 | 0.020 | 0.097 | 0.000 | 0.025 | 0.000 | 0.683 | 0.118 | 0.190 | 1 |

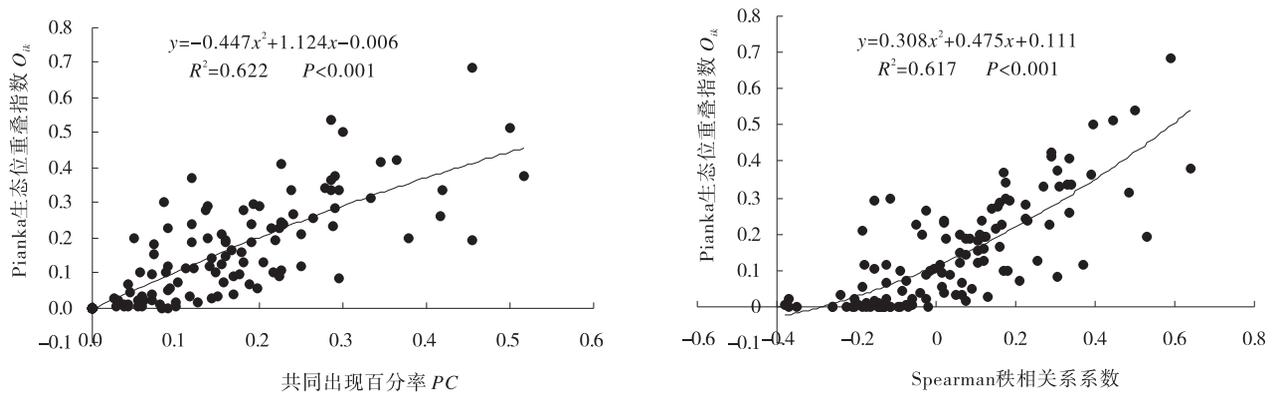


图3 种间关系与生态位重叠的回归分析

Fig. 3 Regression analysis of interspecific associations and niche overlap

少的排序为: Spearman 秩相关检验(33对) > χ^2 检验(31对) > Pearson 相关检验(18对), 说明 Spearman 秩相关检验灵敏度高^[18]。相较于其他2种分析方法, Spearman 秩相关检验所获得的结果更为准确, 一方面是因为 2×2 列联表的 χ^2 检验源于 0、1 数据, 只能作定性描述, 不能够准确地反映两个变量在数量上的变化关系, 另一方面 Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数虽然都是基于定量数据, 但秩相关系数属于非参数检验, 应用起来更为灵活和方便^[19]。

3.2 生态位重叠与种间关系结果基本一致, 同一生态种组的物种生态位重叠较大

从生态位重叠与种间关系看, 16个优势种的

(O_{ik}) 介于 0~0.683, 其中 68.3% 的种对 O_{ik} 值集中在 0~0.3。同时其 O_{ik} 与 PC 值、Spearman 秩相关系数间均呈显著正相关 ($P < 0.05$), Spearman 秩相关系数的拟合效果优于 PC 值, 说明生态位重叠与种间关系结果基本一致, 联结性越强的种对, 其生态位重叠值也越大^[20]。如野艾蒿与甘野菊/小果博落回、荆条与刺槐种对呈极显著正相关, 其 O_{ik} 值较高(分别为 0.515, 0.538, 0.683); 而马齿苋与葎草/甘野菊种对的 O_{ik} 值均为 0, 其种间呈极显著负相关。

Spearman 秩相关聚类将 16 个优势种聚为两大生态种组, 对比生态位重叠数据分析, $O_{ik} \geq 0.3$ 的种对共有 18 对, 其中同一生态种组物种组成的种对占 17 对;

表8 16个优势种在3种检验中的极显著和显著相关种对
Table 8 Extremely significant and significant correlation species pairs of 16 dominant species by three texts

| | 极显著相关 | | 显著相关 | |
|--------------------|---|--------------------|---|--|
| | 正相关 | 负相关 | 正相关 | 负相关 |
| χ^2 检验 | 1-7, 1-12, 2-13, 3-7, 3-15, 3-16, 7-10, 7-13, 7-15, 8-9, 9-15, 13-14, 13-15, 13-16, 14-16, 15-16 | 1-5, 1-10, 4-10 | 1-2, 2-7, 3-11, 3-13, 4-12, 5-10, 6-13, 7-16 | 5-13, 5-15, 5-6, 6-10 |
| Pearson 相关系数 | 1-7, 1-12, 3-15, 8-9, 13-16 | 3-15 | 1-2, 2-7, 2-13, 4-15, 5-10 | 1-5, 1-10, 4-10, 5-13 5-15, 7-8, 7-10 |
| Spearman 秩相 关系数 | 1-7, 1-12, 2-13, 3-7, 3-15, 3-16, 5-10, 7-10, 7-13, 7-15, 8-9, 9-15, 13-14, 13-15, 13-16, 14-16, 15-16, 5-10 | 1-7, 1-12 | 1-2, 2-7, 2-15, 3-11, 3-13, 4-12, 4-16, 7-16, 9-13 | 3-4, 5-13, 5-15, 5-16 |

$O_{ik}=0$ 的种对共 20 对, 其中 15 对为不同生态种组物种组成的种对。说明同一生态种组的物种生态位重叠较大, 不同生态种组的物种生态位重叠较小^[21]。这是由于位于同一生态种组的种对具有相同或相似的资源要求, 它们的生态型相同或相似, 对生境的要求也相似^[22-23]。

3.3 先锋物种及其配置模式筛选

从 Spearman 秩相关系数看, 16 个优势种中, 荆条与白刺花/臭椿/刺槐, 白刺花与刺槐, 臭椿与刺槐种对间呈极显著、显著正相关, 它们耐旱、耐贫瘠、抗污染、生态适应能力强, 可优选为铜尾矿植被修复的先锋物种。从 O_{ik} 与 PC 值看, 荆条与白刺花/臭椿、白刺花与刺槐、臭椿与刺槐种对共同出现的机率较大 (PC 值分别为 0.333、0.286、0.250 和 0.455), 而生态位重叠值较小 (O_{ik} 值分别为 0.315、0.335、0.118 和 0.190), 对共同资源的竞争较小, 适宜进行混合种植; 而荆条与刺槐的 O_{ik} 值 (0.683) 与 PC 值 (0.455) 均较大, 二者的资源利用策略相似, 可能对共同资源的竞争较激烈, 不建议进行高密度混合种植。

4 结论

1) 山西中条山铜尾矿植物群落 16 个优势种种间联结性与相关性结果基本一致, 且 Spearman 秩相关分析灵敏度高。120 个种对中正相关种对占优势, 70% 以上种对呈不显著相关, 群落结构不稳定, 处于演替的初、中期阶段。

2) 16 个优势种的 B_i 与 PC 值、Spearman 秩相关系数之间均呈显著正相关 ($P < 0.05$), 且 Spearman 秩相关系数的拟合效果优于 PC 值。

3) 16 个优势种可聚为两大生态种组, 导致其分化的主导因子是铜尾矿堆积时间的差异。

4) 优势种对荆条与白刺花/臭椿、白刺花与刺槐、臭椿与刺槐呈极显著正相关, 它们 PC 值较大、 O_{ik} 值较小, 耐旱、耐贫瘠、抗污染、生态适应能力强, 可推荐为中条山铜尾矿植被修复的最佳先锋物种和混种模式。而荆条与刺槐的 O_{ik} 值与 PC 值均较大, 二者的资源利用策略相似, 可能对共同资源的竞争较激烈, 不建议进行高密度混合种植。

参考文献:

- [1] 沈章军, 孙庆业, 田胜尼. 铜尾矿自然定居白茅对体内氮磷的适时分配及叶片氮磷代谢调节酶活性动态[J]. 植物生态学报, 2012, 36(2): 159.
- [2] Grieg-Smith P. Quantitative Plant Ecology[M]. (3rd edition) Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1983: 23.
- [3] 张金屯. 数量生态学[M]. (第3版) 北京: 科学出版社, 2018: 22-163.
- [4] 徐满厚, 刘敏, 翟大彤, 等. 植物种间联结研究内容与方法评述[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 8224.
- [5] 李影, 王友保, 刘登义. 安徽铜陵狮子山铜尾矿场植被调查[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1981.
- [6] 叶文玲, 陈增, 徐晓燕. 铜陵铜尾矿库优势植物对重金属富集特征研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(5): 11.

- [7] 田胜尼,张静,孙庆业,等. 铜尾矿自然定居腺柳对重金属吸收及分布的研究[J]. 农业环境科学学报,2013,32(9):1771.
- [8] 田胜尼,孙庆业,王铮峰,等. 铜陵铜尾矿废弃地定居植物及基质理化性质的变化[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(1):87.
- [9] <http://www.zhongtiaoshan.com.cn/index.php?p=about&id=2&lanmu=3>
- [10] 王键,李碧乐,张晗,等. 山西中条山铜矿峪铜矿流体演化特征[J]. 世界地质,2013,32(2):200.
- [11] 马子清. 山西植被[M]. 北京:中国科学技术出版社,2001:153.
- [12] Schluter D. A variance test for detecting species associations, with some example applications[J]. Ecology,1984,65:998-1005.
- [13] 王伯荪,彭少麟. 南亚热带常绿阔叶林种间联结测定技术研究 I. 种间联结测式的探讨与修正[J]. 植物生态学与地植物学丛刊,1985,9(4):274.
- [14] 张峰,张金屯,韩广业. 历山自然保护区猪尾沟森林群落树种间关系及环境解释[J]. 植物生态学报,2002(S1):52-56.
- [15] 房飞,胡玉昆,张伟,等. 高寒草原植物群落种间关系的数量分析[J]. 生态学报,2012,32(6):1898.
- [16] 黄祥童,王绍先,黄炳军,等. 珍稀植物对开蕨与其伴生物种的联结性及群落稳定性[J]. 生态学报,2015,35(1):80-90.
- [17] Bradshaw A D. Restoration of mined lands-using natural processes [J]. Ecological Engineering, 1997, 8 (4) : 255-269.
- [18] 汲文宪,陈丽华,郭峰,等. 北沟林场天然次生林主要乔木树种间关系分析[J]. 东北林业大学学报,2012,40(9):10.
- [19] 李木楠,李志娟,李素清,等. 山西阳泉矿区煤矸石山自然定居植物群落优势种种间关系[J]. 应用与环境生物学报,2015,21(6):1143.
- [20] 李帅锋,刘万德,苏建荣,等. 季风常绿阔叶林不同恢复阶段乔木优势种群生态位和种间联结[J]. 生态学杂志,2011,30(3):508.
- [21] 贺强,崔保山,赵欣胜,等. 水、盐梯度下黄河三角洲湿地植物种的生态位[J]. 应用生态学报,2008,(5):969.
- [22] 吴东丽,张金屯,王春乙,等. 野生大豆群落种群空间分布特性[J]. 生态学杂志,2008,33(8):1290.
- [23] 许宏刚,张建旗,朱亚灵,等. 兰州市南北两山草本植物多样性研究[J]. 草原与草坪,2021,41(3):130-136.

Interspecific relationship and ecological niche of dominant species in the plant communities on copper mine tailings of Zhongtiaoshan in Shanxi province

HAN Jin-tao¹, LI Su-qing^{2*}

(1. Shanxi Sports Vocational College, Taiyuan 030001, China; 2. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: [Objective] Copper mine tailings are typical wastelands formed by the accumulation of a large amount of untreated wastes generated in the process of copper mining and smelting. The long-term massive accumulation of copper mine tailings not only occupies a large amount of land resources, but also aggravates soil erosion and causes secondary geological disasters due to its poor physical structure to maintain water and fertilizer, and brings huge ecological security risks. Therefore, screening of pioneer plants and their configurations suitable for phytoremediation of copper mine tailings is a key strategy for their ecological restoration. [Method] Based on the field investigation, a total of 63 sampling quadrats of 10 m × 10 m, 5 m × 5 m and 1 m × 1 m were respectively sampled for naturally colonized tree, shrub and herbaceous plant communities at different successional stages across the four sampling sites of Tongkuangyu copper mine tailing, Tongkuangyu concentrator copper mine tailing, western copper mine tailing of

Henghe copper plant and Shibah copper mine tailing of Zhongtiaoshan, and 16 dominant plant species were selected. The data matrix of 16×63 (species \times quadrats) were analyzed by the methods of variance ratio (VR), Godron stability, interspecific association and niche index to study the interspecific associations and niche characteristics of dominant species in the plant communities on copper mine tailings of Zhongtiaoshan in Shanxi province, China. **【Result】** The results revealed that: (1) among the 120 species—pairs of 16 dominant species, more than 70% of the species—pairs displayed no significant correlation indicating that the naturally colonized plant communities on copper mine tailings of Zhongtiaoshan had unstable community structures and were in the early or middle stage of succession; (2) There was a significant positive correlation between the niche overlap value (Oik) of the dominant species and the co—occurrence percentage (PC) and Spearman rank correlation coefficient ($P < 0.05$). The fitting effect of Spearman rank correlation coefficient was better than that of PC value; (3) The dominant species—pairs of *Vitex negundo* var *heterophylla* and *Sophora viciifolia* or *Ailanthus altissima*, *S. viciifolia* and *A. altissima* and *A. altissima* and *Robinia pseudoacacia*, showed extremely significantly or significantly positive correlations. **【Conclusion】** These species—pairs were the best pioneer species with higher PC and lower Oik value, strong ecological adaptability for tolerating drought, poor soil fertility and metals contamination, and were thus recommended species—pairs as mixed—planting combinations for future phytoremediation of local copper mine tailings.

Key words: copper mine tailings; dominant species; interspecific association; niche; Zhongtiaoshan

(责任编辑 康宇坤)