



茂名油页岩废弃尾矿生态修复年限和树种的影响研究

张小倩, 罗先真, 张玲玲, 王淑, 温达志

引用本文:

张小倩,罗先真,张玲玲,王淑,温达志. 茂名油页岩废弃尾矿生态修复年限和树种的影响研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(4): 511–519.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4785>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

5种相思树和尾巨桉人工林土壤养分和酶活性特征

Characteristics of Soil Nutrient and Enzyme Activities in Plantations of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* and Five *Acacia* Species
热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 483–493 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4334>

Cd污染及其与大气CO₂浓度升高、N添加复合作用对大叶相思生长的影响

热带亚热带植物学报. 2020, 28(1): 17–24 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4080>

桂西北矿区3种草本植物对铅镉胁迫的生理响应和综合评价

Studies on Physiology Responses to Lead and Cadmium Stress of Three Herbaceous Plants in Northwest Guangxi Mining Area
热带亚热带植物学报. 2021, 29(3): 251–258 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4268>

水肥胁迫对尾叶桉无性系生长及叶片变异的影响研究

Effects of Water and Nutrient Stresses on Growth and Leaf Variation of *Eucalyptus urophylla* Clones
热带亚热带植物学报. 2017, 25(3): 218–224 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3666>

氮磷添加对华南地区2种人工林土壤氮磷循环酶活性的影响

Effects of Long-term Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Enzyme Activities Related N and P Cycle in Two Plantations in South China
热带亚热带植物学报. 2021, 29(3): 244–250 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4293>

向下翻页，浏览PDF全文

茂名油页岩废弃尾矿生态修复年限和树种的影响研究

张小倩^{1,2}, 罗先真¹, 张玲玲¹, 王淑^{1,2}, 温达志^{1,2*}

(1. 中国科学院华南植物园, 中国科学院退化生态系统植被恢复与管理重点实验室, 广州 510650; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以不同修复年限的 2 块油页岩尾矿废弃地上生长的优势树种大叶相思(*Acacia auriculiformis*)和尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)及其根区土壤为对象, 探讨树种和年限对废弃地生态修复效果的影响。结果表明, 经过 31 a 修复的南排尾矿地土壤重金属污染系数为 8, 显著低于修复 18 a 北排尾矿地的 12.33, 表明当前南排尾矿地土壤重金属污染程度更轻。同时, 南排尾矿地的大叶相思和尾叶桉叶片中重金属含量和富集系数显著高于北排尾矿地, 且南排尾矿地植物对土壤中的重金属修复效果好于北排尾矿地。除尾叶桉叶片富集更多的锰外, 大叶相思有更高的叶片碳含量以及锌、镉含量, 表明在多种污染元素并存的油页岩尾矿修复中种植大叶相思比尾叶桉能收获更好的生态效果。大叶相思和尾叶桉都具有较强的去除油页岩尾矿中重金属等有害元素和改善土壤质量的能力, 特别是在土壤贫瘠和多元素污染共存的胁迫下, 大叶相思比尾叶桉表现出更强的优势。

关键词: 油页岩尾矿废弃地; 重金属; 植物修复; 大叶相思; 尾叶桉

doi: 10.11926/jtsb.4785

Studies on the Influence of Tree Species and Ecological Restoration Period on Waste Tailings of Oil Shale in Maoming

ZHANG Xiaoqian^{1,2}, LUO Xianzhen¹, ZHANG Lingling¹, WANG Shu^{1,2}, WEN Dazhi^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystem, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The dominant tree species *Acacia auriculiformis* and *Eucalyptus urophylla* growing on two abandoned oil shale tailings with different restoration years and their root zone soil were used as objects, the influences of tree species and restoration years on the ecological restoration effect of waste lands were studied. The results showed that the heavy metal pollution coefficient of soil in the southern tailing mine after 31 years of restoration was 8, which was significantly lower than the 12.33 of the north tailing mine after 18 years of restoration, indicating that the current heavy metal pollution degree of soil in the southern tailing mine was lighter. The heavy metal concentration and enrichment coefficient in leaves of *A. auriculiformis* and *E. urophylla* in the southern tailing mine were significantly higher than those in the northern tailing mine, and the remediation effect of trees in the southern tailing mine was better than that in the northern tailing mine. In addition to the more manganese enrichment in *E. urophylla* leaves, *A. auriculiformis* leaves had higher concentration of carbon, zinc, and cadmium, suggesting that *A. auriculiformis* planted in oil shale tailing remediation with multiple pollution elements could achieve better ecological effects than *E. urophylla*. Therefore, both *A. auriculiformis* and *E. urophylla* had strong

收稿日期: 2023-03-10 接受日期: 2023-07-17

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项项目(GML2019ZD0408)资助

This work was supported by the Major Special Project for Talent Team Introduce of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Provincial Laboratory (Guangzhou) (Grant No. GML2019ZD0408).

作者简介: 张小倩(1999年生), 女, 硕士研究生, 研究方向为环境生态学。E-mail: 1850807804@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dzwen@scbg.ac.cn

ability to remove heavy metals and other harmful elements from oil shale tailings and improve soil quality, and especially *A. auriculiformis* showed more advantages than *E. urophylla* under the coexisted stresses of site poverty and multi-element pollution.

Key words: Oil shale tailings wastland; Heavy mental; Phytoremediation; *Acacia auriculiformis*; *Eucalyptus urophylla*

广东省茂名地区拥有丰富的油页岩资源, 被誉为“南方油城”。20 世纪 50 年代末, 茂名开始对油页岩资源进行露天开采, 为缓解新中国石油能源紧缺和经济建设做出了重要贡献。然而, 油页岩开采和石油提炼过程对生态环境造成了巨大的影响, 经过 30 多年的开采于 1992 年停产, 形成 1 个面积约 6 km² 的长条形露天采坑, 常年积水形成污水湖。大量矿渣弃土堆砌在采坑周边, 形成了现在的南排土场(面积 1.4 km²)和北排土场(面积 6.7 km²)^[1-2]。油页岩尾矿排土场土壤贫瘠, 保水保肥能力差, 土壤酸化和重金属镉(Cd)、铅(Pb)、锰(Mn)、锌(Zn)以及非重金属有害元素铝(Al)、砷(As)等对尾矿排土场植物的生长造成严重影响^[3-4], 茂名市委市政府在油页岩矿关停后, 开始对南北 2 个排土场实施生态修复。21 世纪初, 中国科学院华南植物园研究人员在南排和北排废弃地上分别种植 20 余种植物, 其中包括豆科速生树种大叶相思和非豆科速生树种尾叶桉进行修复^[5-6]。据资料和现场调研^[1-2], 南排土场生态恢复时间较长(约 31 a), 目前已打造成露天矿山森林公园, 北排土场生态修复时间约 18 a, 也已经形成近自然森林。这些前期工作为本研究探讨不同恢复年限及不同树种对油页岩尾矿生态恢复效果提供了得天独厚的天然实验场所。

重金属会引起植物体内的氧化应激反应导致细胞损伤, 在外表现为植物的光合与呼吸作用受到影响, 正常生长受阻, 严重时直接引起植物死亡^[7]。油页岩废渣堆积区土壤呈强酸性, 促进包括 Pb、铜(Cu)、Cd、镍(Ni)、Zn 的活化, 对植物产生毒害作用^[8]。植物修复是一种绿色经济且可持续发展的污染场地修复方式, 一些植物能够耐受一定范围内的重金属浓度, 达到去除环境中重金属的目的。大叶相思和尾叶桉在南北 2 个尾矿地均有大量种植^[9], 具有速生、快速积累生物量和元素周转循环的特点, 是该油页岩尾矿废弃地生态修复的优势树种。然而, 不同年限(31 a 和 18 a)的生态修复效果如何, 不同树种在对重金属等有害元素的富集、氮磷养分需求和改良土壤质量等方面是否存在差异以及在哪

些方面表现出优势和应用潜力等问题目前仍不清楚。因此, 本研究以南排和北排尾矿生态修复区的大叶相思和尾叶桉为对象, 通过测定土壤和植物中的重金属(Mn、Zn、Cd、Pb)和非重金属有害元素(Al、As)含量以及土壤 pH 值、有机质、氮(N)、磷(P)、钾(K)、土壤质地、土壤酶活性等指标^[10], 旨在探讨不同年限和不同树种对油页岩尾矿生态修复的影响及差异, 为油页岩露天矿山废渣弃土堆场的恢复治理提供科学依据和实践应用指导。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

研究地位于广东省茂名市茂南区(110°20′~111°40′ E, 21°25′~22°43′ N), 属于亚热带季风气候, 年均温 22.8 °C~23.4 °C, 年降雨量 1 500~1 800 mm, 具有雨热充沛、干湿季明显的气候特征, 适合植物生长。茂名背山面海, 地势北高南低, 矿产资源丰富, 油页岩是其优势矿产之一。

茂名油页岩露天采矿场分为 2 处: 南排土场(简称南排)和北排土场(简称北排)^[1]。南排、北排矿渣弃土堆砌物占地面积分别为 3.31、6.7 km², 废渣堆砌场土质低劣, 植被稀少^[1,5]。根据推算, 截至 2021 年, 南排和北排尾矿地生态修复年限分别为 31 和 18 a^[4]。图 1 为 2 个排土场的卫星影像和采样点。

1.2 样品采集

选取大叶相思和尾叶桉为研究对象, 因其在 2 地种植面积大、数量多、长势好, 具有代表性。2021 年 12 月在南排、北排各选取 3 块样地(面积各为 10 m×10 m), 样地中选择集中生长的尾叶桉和大叶相思树林, 林中选择树高、胸径适中的树木, 每树种选择 3 株作为重复, 采集 2 树种的健康成熟叶片、凋落叶、0~10 和 10~20 cm 土壤, 记录采集树木的树高和胸径。距离林地采样点约 100 m 的空旷裸地, 随机设置 3 块样地, 每块面积 50~100 m², 采集土壤。重复样品混匀形成混合样置于密封袋中并冷藏。将保鲜样品带回实验室, 土壤过 2 mm 筛, 一部分自

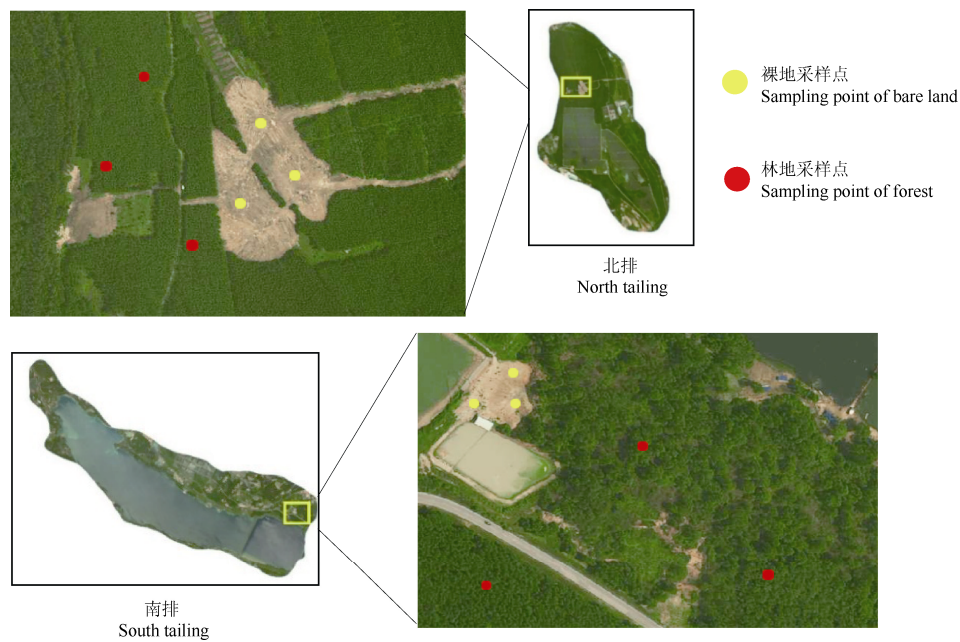


图1 南、北排卫星影像及采样点位置

Fig. 1 Satellite image and sampling points of south and north tailing mine

然风干, 一部分放置在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱待用。

1.3 方法

对土壤的基本理化性质、重金属或非重金属有害元素含量和土壤酶活性及叶片有害元素含量进行测定。采用烘干法测定土壤水分含量; 电位法测定土壤 pH 值; 重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤和叶片有机质含量^[11]; 靛酚蓝比色法测定土壤和叶片全氮含量^[11]; 钼锑抗比色法测定土壤和叶片全磷含量^[11]。低能量超声波分散-湿筛分组-冷冻干燥法测定土壤质地^[12]; 土壤和植物中的 Mn、Zn、As、Cd、Pb、Al 元素含量, 采用微波消解法消解, 之后用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)和电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定; 参照 Freeman 等^[13-14]的方法, 测定土壤中的 β -葡糖苷酶(BG)、酸性磷酸酶(AP)、 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)和过氧化氢酶(CAT)。植物叶片叶绿素含量用丙酮浸提, 参照林植芳等^[15]的方法测定。

用单因子质量指数法分析各元素在当地背景值下的含量比值: $P_i = C_i/S_i$, 其中, P_i 为元素的污染指数, C_i 为元素含量实测值, S_i 为元素含量背景值。若污染指数 $P_i \leq 1.0$, 则重金属含量在土壤背景值含量之内; 若 $P_i > 1.0$, 则重金属含量已超过土壤背景值, 指数越大则表明土壤重金属累积污染程度越高。

在单因子质量指数的基础上用内梅罗综合污染指数法从综合角度考虑矿区土壤重金属的污染

状况^[16]:

$$P_i = \sqrt{[(P_{imax})^2 + (P_{iave})^2]} \times 0.5, \text{ 式中, } P_i \text{ 为矿}$$

区的综合污染指数; P_{imax} 为矿区所有重金属元素单因子污染指数中的最大值; P_{iave} 为矿区所有重金属元素单因子污染指数的平均值, 上述参数均为无量纲。

1.4 数据的统计分析

采用 IBM SPSS Statistics 25 对数据进行统计分析, 采用独立样本 t 检验对 2 地和 2 树种间的差异进行比较, 用皮尔逊相关性分析测定指标之间的相关性, 显著性水平设为 $P < 0.05$ 。用 Origin2022 绘图。图表中数据为平均值 \pm 标准误。

2 结果和分析

2.1 土壤基本理化性质特征

从表 1 可见, 南排、北排 2 个修复区的土壤含水量和 pH 值低, 有机质、氮(N)、磷(P)含量较低, 表明土壤呈强酸性、贫瘠且保水能力差。土壤砂土占比最高, 粉土和黏土次之, 透气性较好。北排裸地土壤含水量、pH 值、土壤 N、P 含量均显著高于南排裸地, 北排尾叶桉林下土壤 pH 值、N、砂土含量均显著高于南排尾叶桉土壤, 同样, 北排大叶相思林下土壤 pH 值、N 含量也显著高于南排大叶相思土壤, 钾(K)含量则低于南排。取裸地与植物修

复区土壤平均值分析表明,北排土壤的 pH 值、含水量、N、P 含量以及砂土百分比均显著高于南排, K 含量低于南排。北排虽然修复时间较南排短,但土壤基本理化性质和肥力水平整体优于南排,可能是近 20 a 的植物生长和凋落物碳(C)、N、P 等养分元素周转循环,促进了土壤改良进程。南排土壤 pH 值、P 含量和砂土百分比含量均显著高于裸地,北排土壤 pH 值高于裸地,但 P、K 含量均低于裸地,这可能是植物吸收土壤中养分元素并大量积累在其生物量中所致。2 树种林下土壤基本理化性质的差异不显著,大叶相思土壤的养分元素含量略高于尾叶桉土壤,表明大叶相思比尾叶桉在改善土壤肥力方面更有优势。

大叶相思叶片、凋落物及土壤的 C、N、P 元素

计量比在南排和北排间的差异均不显著(表 2)。南排尾叶桉叶片、凋落物和土壤的 N:P、C:P 则低于北排,表明南排尾叶桉对 P 的利用比北排尾叶桉更高效,但南排尾叶桉的 C:N 比北排高,表明北排尾叶桉具有更高的 N 利用效率或面临更大的缺 N 限制生长的风险。C:N 是表征凋落物质量的重要指标,较低的 C:N 意味着凋落物分解受 N 限制小,易于被微生物分解,C、N、P 循环利用效率高,具有更优越的改良土壤的能力。南北生态修复区大叶相思叶和凋落物中的 C:N 均低于尾叶桉,可能是因为大叶相思是速生固 N 树种,其叶片和凋落物 N 含量较尾叶桉高。此外,大叶相思的 N:P 均高于尾叶桉,意味着大叶相思对 P 的需求较低或生长受 P 限制,需补充 P 肥以实现更大的生产力。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

地点 Site	土壤 Soil	含水量 SWC /%	pH	有机碳 SOC (g/kg)	氮 N (g/kg)	磷 P (g/kg)	钾 K (g/kg)	土壤质地 Soil texture /%		
								砂土 Sand	粉土 Silt	黏土 Clay
南排 South tailing	I	5.83±0.43	3.88±0.05a	10.68±1.48	0.42±0.04A	0.04±0.01a	5.20±2.00a	54.50±0.96Aa	17.67±0.89a	19.83±0.95
	II	6.95±0.33	3.83±0.10Aa	16.24±3.17	0.56±0.07A	0.04±0.01a	11.30±1.1Ab	52.00±2.08ab	18.83±1.19a	20.33±1.02
	III	6.20±0.51A	3.54±0.04Ab	13.29±2.80	0.40±0.06A	0.03±0.01Ab	7.50±2.30ab	48.50±1.61b	22.50±0.96b	20.83±1.35
	IV	6.33±0.26A	3.75±0.53A	13.04±1.73	0.45±0.38A	0.04±0.01A	8.00±1.20A	51.67±1.06A	20.07±0.74	20.33±0.61
北排 North tailing	I	6.38±0.31	4.36±0.08Ba	10.69±2.95a	0.85±0.11B	0.04±0.01a	2.20±0.20a	58.33±1.41B	19.83±0.70	16.50±1.98a
	II	10.80±1.94	4.17±0.07Ba	33.09±9.04b	1.92±0.50B	0.05±0.01a	0.40±0.7Bab	55.67±1.33	21.17±0.48	16.33±1.98a
	III	10.02±1.3B	3.80±0.03Bb	20.71±4.84ab	1.90±0.33B	0.15±0.04Bb	5.11±0.9b	53.00±3.33	20.50±0.82	23.33±1.91b
	IV	8.83±0.85B	4.11±0.66B	21.45±4.01	1.56±0.23B	0.08±0.02B	3.82±0.50B	55.67±1.31B	20.50±0.82	18.72±1.32

I: 尾叶桉林; II: 大叶相思林; III: 裸地; IV: 平均值; 同列数据后不同大、小写字母分别表示不同修复年限同一植物土壤和同一修复年限不同植物土壤间差异显著($P<0.05$)。下同

I: *Eucalyptus urophylla* forest; II: *Acacia auriculiformis* forest; III: Bare land; IV: Average. Data followed different capital and small letters within column indicate significant differences at 0.05 level among different restoration years of the same plant and between two species at the same restoration years. The same below

表 2 鲜叶、凋落物与土壤元素计量比

Table 2 Elemental stoichiometry ratio in fresh leaves, litter and soil

地点 Site	树种 Species	项目 Item	C:N	N:P	C:P
南排 South tailing	尾叶桉 <i>Eucalyptus urophylla</i>	叶片 Leaf	27Aa	15Aa	396a
		凋落物 Litter	71a	18Aa	1 277Aa
		土壤 Soil	27A	3A	73
	大叶相思 <i>Acacia auriculiformis</i>	叶片 Leaf	15b	46b	673b
		凋落物 Litter	29b	53b	1 570b
		土壤 Soil	32	4	36
北排 North tailing	尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	叶片 Leaf	19Ba	23Aa	434a
		凋落物 Litter	65a	26Ba	1 698B
		土壤 Soil	11B	4B	50
	大叶相思 <i>A. auriculiformis</i>	叶片 Leaf	15b	42b	607b
		凋落物 Litter	32b	49b	1 568
		土壤 Soil	17	6	101

2.2 植物生长情况

尾叶桉和大叶相思在 2 地区种植广泛且长势良好, 现场调查时发现衰老、枯死症状。从表 3 可见, 北排树木仅在树高和胸径上存在显著差异, 南排树木高于北排但胸径较小。就树种而言, 南排大叶相思胸径显著小于尾叶桉。南排尾叶桉 N 含量低于北

排, K 含量则高于北排, 与土壤中的 N 和 K 含量相吻合。此外, 2 个修复区的大叶相思叶 N 含量均显著高于尾叶桉, 而 P 含量则显著低于尾叶桉, 表征了大叶相思固 N 方面的突出优势但可能面临 P 限制, 而速生尾叶桉比大叶相思对 P 吸收具有更强竞争力和 P 周转循环能力。

表 3 尾叶桉和大叶相思的基本性状

Table 3 Basic status of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia auriculiformis*

地点 Site	树种 Species	树高 (m) Height	胸径 (cm) Diameter	叶绿素 a Chl a ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	叶绿素 b Chl b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	有机碳 SOC (g/kg)	TN (g/kg)	TP (g/kg)	TK (g/kg)
南排 South tailing	尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	20.00±0.58A	24.67±1.20a	35.33±12.12	31.37±21.44	448.63±5.22	16.51±0.75aA	1.14±0.07a	63.37±2.03A
	大叶相思 <i>A. auriculiformis</i>	18.33±0.88A	17.33±2.03bA	52.84±10.50	54.22±21.97	463.10±3.66	31.77±0.88b	0.69±0.04b	117.90±17.08
北排 North tailing	尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	15.67±0.33B	32.33±3.93	46.20±9.00	53.10±20.85	453.87±1.33	24.25±0.94aB	1.05±0.05a	94.37±2.04B
	大叶相思 <i>A. auriculiformis</i>	11.67±1.45B	35.33±0.88B	70.39±4.69	78.59±2.02	460.63±4.65	31.61±1.00b	0.76±0.02b	73.10±5.23

TN: 总 N; TP: 总 P; TK: 总 K。

TN: Total N; TP: Total P; TK: Total K.

2.3 尾矿土壤重金属元素含量

对比 2 个排土场的裸地重金属或非重金属有害元素含量(图 2), 除 Pb 外, 北排裸地土壤 Mn、Zn、As、Cd、Al 元素含量均高于南排, 表明在修复前南排土壤污染程度较北排更轻。南排植物根区土壤与裸地土壤中的元素含量无显著差异, 而北排尾叶

桉根区土壤的 Zn、As、Al 均显著低于裸地, 大叶相思根区土壤的元素含量和裸地的差异不显著。南排土壤元素含量总体低于北排, 其原因可能是修复前南排土壤中较低的背景值, 或随着植物修复进程这些元素的含量在下降。南排尾叶桉土壤的 As、Al 高于大叶相思, Pb 含量显著低于大叶相思土壤,

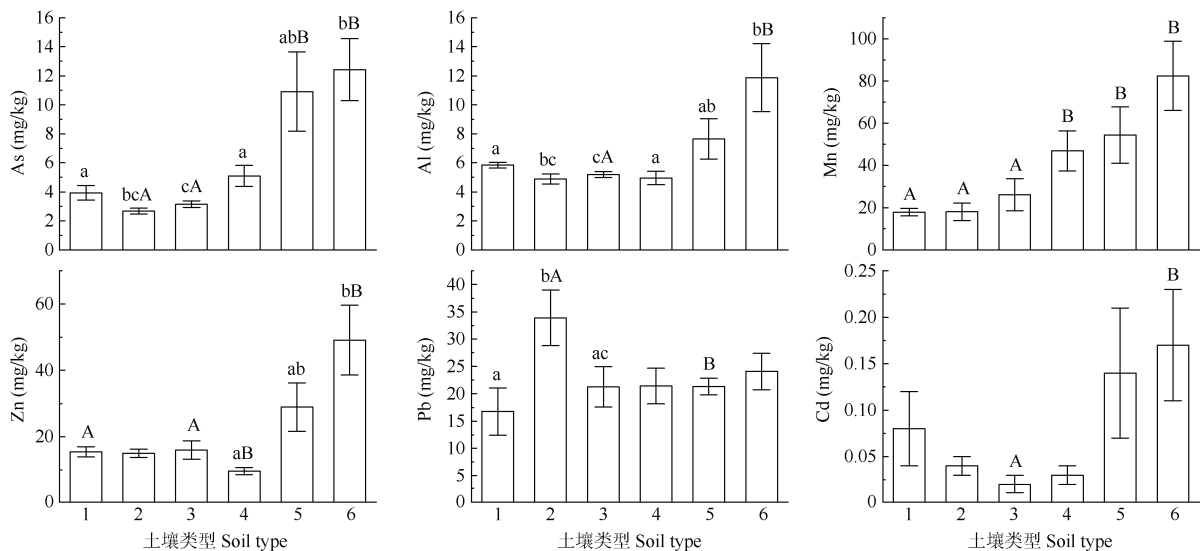


图 2 南排(1~3)和北排(4~6)土壤重金属含量。1, 4: 尾叶桉林; 2, 5: 大叶相思林; 3, 6: 裸地; 柱上不同大、小写字母分别表示不同修复年限同一植物土壤和同一修复年限不同植物土壤间差异显著($P<0.05$)。下同

Fig. 2 Concentration of heavy metal elements in soils of south (1–3) and north (4–6) tailings. 1, 4: *Eucalyptus urophylla* forest; 2, 5: *Acacia auriculiformis* forest; 3, 6: Bare land. Different capital and small letters upon column indicate significant differences at 0.05 level among different restoration years of the same plant and between two species at the same restoration years. The same below

可见植物对土壤污染的修复不仅与树种有关,而且依赖于特定元素。

为了更直观地了解矿区重金属污染程度,采用内梅罗污染指数法进行评价。首先用单因子质量指数法分析各元素在当地背景值下的含量比值,计算

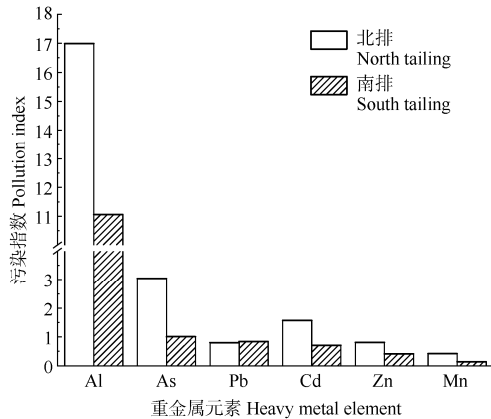


图 3 南排和北排土壤重金属污染指数

Fig. 3 Heavy metal pollution index of soil in south and north tailing mine

表 4 南排和北排植物重金属元素含量

Table 4 Concentration of heavy metal elements in plant leaf of the north and south tailings

地点 Site	植物 Species	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Al (mg/kg)
南排 South tailing	尾叶桉 <i>Eucalyptus urophylla</i>	1 848.60±85.29aA	48.67±7.23A	2.02±1.63	0.17±0.02A	3.22±1.20	258.75±4.61
	大叶相思 <i>Acacia auriculiformis</i>	262.22±32.73b	56.05±8.98	0.40±0.10	0.12±0.02A	3.36±0.63	297.78±12.37
北排 North tailing	尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	732.22±103.7aB	19.99±1.46aB	0.75±0.59	0.01±0.01aB	1.82±0.29	237.50±10.74
	大叶相思 <i>A. auriculiformis</i>	269.03±59.48b	35.20±1.93b	0.24±0.03	0.05±0.01bB	1.66±0.19	269.86±60.40

2.5 植物富集系数

富集系数是反映生活在污染环境中的生物富集化学物质的重要生态毒理学参数,表征为植物器官的元素含量与土壤中对对应元素含量的比值。由图 4 可见,修复 31 a 南排树木叶片的富集系数总体上比修复 18 a 北排树木高。南排尾叶桉和大叶相思叶片中 As、Pb 富集系数分别约为北排的 4 和 2 倍, Zn、Cd、Mn、Al 则不存在显著差异。此外,南排尾叶桉 Mn 富集系数比北排高。在树种水平上,南排尾叶桉 Mn、Pb 富集系数大于大叶相思,但后者的 Al 富集系数较高;北排尾叶桉与大叶相思富集系数的差异不显著。

3 讨论和结论

3.1 土壤基本理化性质差异

土壤 pH、含水量、N、P 含量反映了土壤的肥

As、Cd、Mn、Zn、Pb 的污染指数(图 3)。土壤元素背景值取自广东省地质调查院^[17]。修复 31 a 的南排,土壤 Al、As 含量超出了当地土壤背景值,污染指数分别为 11.06、1.01,其他含量未超过当地背景值。而修复 18 a 的北排土壤 Al、As、Cd 超出背景值,污染指数分别为 16.99、3.05 和 1.57, Mn、Zn、Pb 未达到污染水平。多数元素在北排的污染指数高于南排,2 地污染指数最高的均为 Al 元素。在单因子污染指数基础上计算内梅罗污染指数,得出南排尾矿的重金属综合污染指数为 8,北排为 12.33,2 地均为重度污染水平。

2.4 植物重金属元素含量

南排修复区植物叶片中 Mn、Zn、Cd 含量均显著高于北排(表 4),这与其林下土壤元素含量低于北排的结果相反,表明南排植物对这些元素的富集能力高于北排。尾叶桉对 Mn 元素的吸收显著多于大叶相思,但大叶相思对 Zn、Cd 的吸收多于尾叶桉。总体而言,大叶相思对重金属元素的富集效果比尾叶桉好。

力状况,土壤质地表征土壤的物理性质如持水性和保肥能力,同样是土壤肥力指证之一,通常保肥性能是黏土>粉土>砂土^[18-19],砂土保肥性能弱但透气性更好。本研究中,2 个排土场土壤含水量低, pH 低,有机碳、N、P 含量较低,表明土壤呈酸性且较贫瘠。土壤中砂土占比最高,粉土和黏土次之,土壤透气性较好。尽管南排、北排修复时间不同,2 地区有植物生长的土壤其立地条件均优于裸地,表明植物能利用其自身生产力增加土壤的养分输入,对当地土壤的改良效果明显。在有植物生长的土壤,北排土壤 pH、含水量以及养分元素含量均显著高于南排,且砂土含量显著高于南排,其土壤透气性更好,表明北排土壤更具肥力。北排裸地的含水量、pH 和养分元素含量同样高于南排,这可能是由于北排有着更好的水热条件或是其植物生长改善了周边的裸地理化性质。北排虽修复时间较南排短,

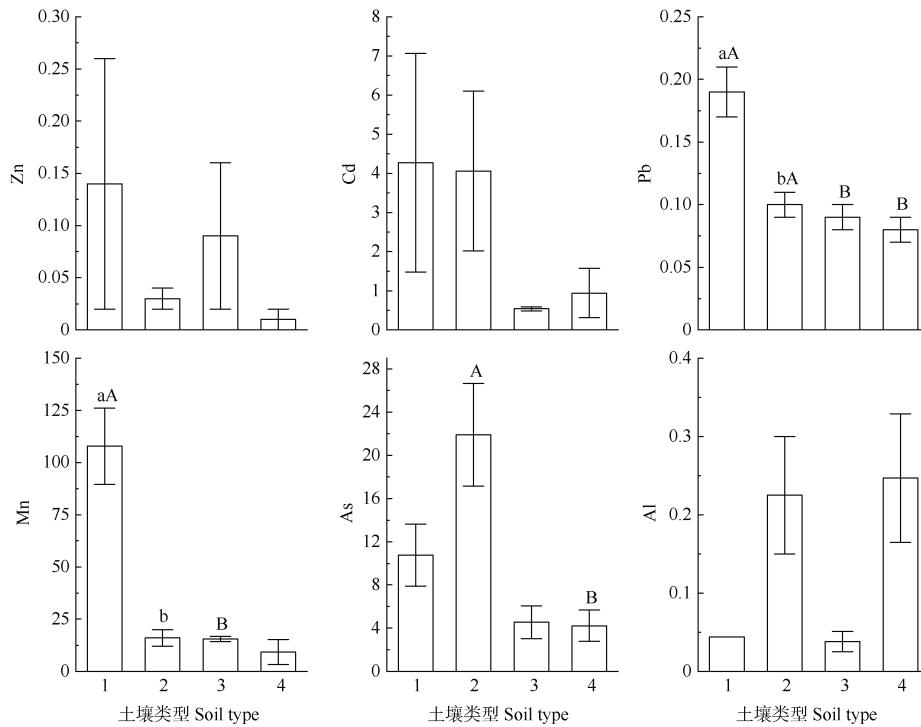


图4 南排(1~2)和北排(3~4)植物的重金属富集系数。1, 3: 尾叶桉林; 2, 4: 大叶相思林。

Fig. 4 Heavy metal enrichment coefficient in leaves of south (1~2) and north (3~4) tailings. 1, 4: *Eucalyptus urophylla*; 2, 5: *Acacia auriculiformis*.

但土壤立地条件整体优于南排, 可能是近 20 a 的植物生长和凋落物 C、N、P 等养分元素周转循环, 促进了土壤改良进程。

同一地区内 2 树种林下土壤基本理化性质差异较小, 大叶相思土壤的养分元素含量略高于尾叶桉土壤, 表明大叶相思比尾叶桉在改善土壤肥力方面更有优势。C、N、P 元素在植物、凋落物和土壤间的化学计量变化是生态系统运作的重要环节。C:N 低则说明有机质分解速度越快, 而 N:P 是植物生长、凋落物分解的敏感指数^[20], 表征植物生长时受到的养分限制情况。南排植物对 P 有着更高的周转效率, 但 C 循环速率慢。大叶相思比尾叶桉有更高的 N 利用效率, 应是源于其作为豆科植物所拥有的固 N 机制, 但其对 P 的利用效率不如尾叶桉。相比于尾叶桉, 大叶相思具有高 C 高 N 低 P 含量的特点。因此, 在茂名油页岩废弃矿场的生态修复实践中, 对尾叶桉生长的树林施以 N 肥, 对大叶相思生长的地方施加 P 肥, 能够减少植物受到养分限制, 更好地满足其养分需求, 更快更好地促进植物修复。

3.2 土壤重金属污染差异

相比南排, 北排土壤重金属元素含量更高, 内梅罗污染指数达 12.33, 而南排的污染指数为 8, 污染程度较轻。南排裸地的重金属含量显著低于北

排, 表明在修复前南排土壤污染程度可能较北排轻; 北排林下土壤的重金属含量显著低于裸地, 而南排林下土壤重金属含量低, 且与裸地间的差异不显著, 可能是南排土壤重金属背景值更低, 或是北排植物对重金属的吸收效果较南排更明显。尾叶桉与大叶相思林下土壤元素含量差异较小, 大叶相思可能吸收了土壤中更多的 As 和 Al, 而尾叶桉可能吸收了更多的 Pb, 可见植物对土壤污染的修复不仅与树种有关, 而且依赖于特定元素。在所有测定的 Cd、Pb、As、Al 等重金属元素中, 南排和北排土壤 Al 含量均最高, 危害风险较大, 在当前报道的 Al 富集植物很少的情况下, 可适当提高土壤 pH 值以减轻其毒性。2 地土壤 As 含量同样很高, 以后在茂名的植物修复中可以适量种植蕨类等 As 富集植物^[21-22]。对于重金属污染较严重的 Cd、Pb、Zn, 也可以适当种植东南景天(*Sedum alfredii*)、龙葵(*Solanum nigrum*)等超富集植物^[23]。植物在吸收某一重金属时会受到其他重金属元素的影响, 重金属元素间可能存在协同作用或者拮抗作用^[24]。

3.3 植物对重金属的吸收

尾叶桉和大叶相思在 2 地区种植广泛且长势良好。南排植物对重金属吸收量与富集系数显著高于北排, 南排土壤重金属含量显著低于北排, 表明南

排植物对重金属的吸收效果比北排更好,可见随着修复年限的增加,植物对重金属的富集效果更好。这是因为植物吸收了环境中的重金属,并对尾矿的土壤起到了很好的改良效果。

2 树种对重金属的吸收具有针对性,尾叶桉对 Mn 的吸收效果突出,大叶相思对 Zn、Cd 的吸收能力较强,大叶相思比尾叶桉能富集更多的重金属。有研究表明,桉属植物对 Mn 具有较强的富集能力,巨尾桉(*Eucalyptus grandis*×*E. urophylla*)、蓝桉(*E. globulus*)和柠檬桉(*E. citriodora*)具有独特的 Mn 解毒机制,能够将过量的 Mn 积累在体内^[25-26],这可能源于桉属植物自身独特的解毒机制,而豆科植物蚕豆(*Vicia faba*)对 Zn、Cd 的吸收明显^[27],可见不同植物对不同元素的耐受性各异。

综上,南排和北排尾矿地虽然经历数十年的植被修复,但土壤中 Al、As 含量较高,提示这 2 个金属元素的污染风险仍然存在,应纳入监测和重点治理。植物恢复区土壤比裸地土壤具有更低的重金属元素含量、更高的土壤酶活性以及土壤理化性质改善,表明植被恢复对矿区土壤改良效果明显。相比修复 18 a 的北排,修复 31 a 的南排植物重金属含量和富集系数更高,表明植物修复的时间越长越好,也暗示南排深层土壤中仍然存在重金属污染的可能性。大叶相思叶片养分元素吸收量低于尾叶桉,重金属吸收量则大于尾叶桉,表明大叶相思在贫瘠且受重金属污染的土壤修复中比尾叶桉更有优势。

参考文献

- [1] WU J L, SU S Q, FENG M L, et al. Practice and exploration of ecological restoration in oil shale open-pit mine in Maoming [J]. Land Resour, 2019(11): 56–58. [吴家龙, 苏少青, 冯妙玲, 等. 茂名油页岩露天矿生态修复的实践探索 [J]. 国土资源, 2019(11): 56–58. doi: 10.3969/j.issn.1671-1904.2019.11.022.]
- [2] TU N Y, LIU Y, JIN R H. The primary environmental problems associated with oil shale opencast mining in Maoming [J]. Guangdong Chem Ind, 2011, 38(7): 86–87. [涂宁宇, 刘洋, 金仁和. 茂名市油页岩露天矿开采引发的主要生态环境问题研究 [J]. 广东化工, 2011, 38(7): 86–87. doi: 10.3969/j.issn.1007-1865.2011.07.046.]
- [3] LIU H, GUO X X, LI L. Study on soil properties variation in bioremediation process for north and south oil shale dump in maoming [J]. J Anhui Agric Sci, 2012, 40(12): 7112–7114. [刘华, 郭先霞, 李璐. 茂名南、北排土场生物修复中土壤性状变化的研究 [J]. 安徽农业科学, 2012, 40(12): 7112–7114. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2012.12.051.]
- [4] KONG G H, LIU S Z, CHEN Z D, et al. Ecological effect of phytoremediation on oil shale waste dumps [J]. J Trop Subtrop Bot, 2006, 14(1): 61–68. [孔国辉, 刘世忠, 陈志东, 等. 油页岩废渣场植物修复的生态效应 [J]. 热带亚热带植物学报, 2006, 14(1): 61–68. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2006.01.010.]
- [5] XIA H P, HUANG J, KONG G H. Ecological restoration of oil shale waste dumps [J]. Acta Ecol Sin, 2004, 24(12): 2887–2893. [夏汉平, 黄娟, 孔国辉. 油页岩废渣场的生态恢复 [J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2887–2893. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2004.12.033.]
- [6] KONG G H, LIU S Z, WU T, et al. Differences in photosynthesis and plant growth of 26 woody species at the oil shale waste dump [J]. J Trop Subtrop Bot, 2006, 14(6): 467–476. [孔国辉, 刘世忠, 吴彤, 等. 油页岩废渣场 26 种木本植物光合作用和生长的差异 [J]. 热带亚热带植物学报, 2006, 14(6): 467–476. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2006.06.003.]
- [7] ASATI A, PICHHODE M, NIKHIL K. Effect of heavy metals on plants: An overview [J]. Int J Appl Innov Eng Manage, 2016, 5(3): 56–66. doi: 10.13140/RG.2.2.27583.87204.
- [8] XIA H P, KONG G H, AO H X, et al. Comparison of four herbaceous plants in Pb and Cd uptake from oil shale residue derived soil [J]. Rural Ecol Environ, 2000, 16(4): 28–32. [夏汉平, 孔国辉, 敖惠修, 等. 4 种草本植物对油页岩矿渣土中铅镉的吸收特性比较试验研究 [J]. 农村生态环境, 2000, 16(4): 28–32. doi: 10.3969/j.issn.1673-4831.2000.04.007.]
- [9] DENG Z P, LI L H, LIANG C. Experimental investigation on the reuse of resource in Maoming, Guangdong, Oil Shale Disposal [J]. Ecol Sci, 2000, 19(4): 57–61. [邓钊平, 李丽华, 梁朝. 茂名油页岩废渣场土地资源再利用试验研究 [J]. 生态科学, 2000, 19(4): 57–61. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2000.04.009.]
- [10] LIU S L, FU B J, LIU G H, et al. Research review of quantitative evaluation of soil quality in China [J]. Chin J Soil Sci, 2006, 37(1): 137–143. [刘世梁, 傅伯杰, 刘国华, 等. 我国土壤质量及其评价研究的进展 [J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 137–143. doi: 10.3321/j.issn:0564-3945.2006.01.032.]
- [11] LIU G S. Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles [M]. Beijing: Standards Press of China, 1996: 166–170. [刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 166–170.]
- [12] SINGH S, SINGH J S. Water-stable aggregates and associated organic matter in forest, savanna, and cropland soils of a seasonally dry tropical region, India [J]. Biol Fert Soils, 1996, 22(1): 76–82. doi: 10.1007/BF00384436.
- [13] FREEMAN C, LISKA G, OSTLE N J, et al. The use of fluorogenic

- substrates for measuring enzyme activity in peatlands [J]. *Plant Soil*, 1995, 175(1): 147–152. doi: 10.1007/BF02413020.
- [14] ALLISON S D, VITOUSEK P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs [J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37(5): 937–944. doi: 10.1016/j.soilbio.2004.09.014.
- [15] INSKEEP W P, BLOOM P R. Extinction coefficients of chlorophyll a and b in *N,N*-dimethylformamide and 80% acetone [J]. *Plant Physiol*, 1985, 77(2): 483–485. doi: 10.1104/pp.77.2.483.
- [16] YIN G Q, JIANG H, WANG Q. Analysis of the sources and characteristics of heavy metals in farmland soil from a typical district in Anhui Province [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2018, 37(1): 96–104. [尹国庆, 江宏, 王强. 安徽省典型区农用地土壤重金属污染成因及特征分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(1): 96–104. doi: 10.11654/jaes.2017-0911.]
- [17] LUO S L. Analysis of soil geochemical background values and reference values in Yangjiang Maoming area of Guangdong Province [J]. *Yunnan Chem Ind*, 2018, 45(6): 89–92. [罗思亮. 广东省阳江-茂名地区土壤地球化学背景值与基准值分析 [J]. *云南化工*, 2018, 45(6): 89–92. doi: 10.3969/j.issn.1004-275X.2018.06.038.]
- [18] LAL R. Physical management of soils of the tropics: Priorities for the 21st century [J]. *Soil Sci*, 2000, 165(3): 191–207. doi: 10.1097/00010694-200003000-00002.
- [19] GE N N, SHI Y, YANG X L, et al. Distribution of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and water stable aggregates of cropland with different soil textures on the Loess Plateau, northwest China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, 28(5): 1626–1632. [葛楠楠, 石芸, 杨宪龙, 等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28(5): 1626–1632. doi: 10.13287/j.1001-9332.201705.021.]
- [20] WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28(8): 3937–3947. [王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征 [J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937–3947. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2008.08.054.]
- [21] MEHARG A A. Variation in arsenic accumulation-hyperaccumulation in ferns and their allies: Rapid report [J]. *New Phytol*, 2003, 157(1): 25–31. doi: 10.1046/j.1469-8137.2003.00541.x.
- [22] VISOOTTVISETH P, FRANCESCONI K, SRIDOKCHAN W. The potential of thai indigenous plant species for the phytoremediation of arsenic contaminated land [J]. *Environ Pollut*, 2002, 118(3): 453–461. doi: 10.1016/S0269-7491(01)00293-7.
- [23] ZHANG J W, CAO X R, YAO Z Y, et al. Phytoremediation of Cd-contaminated farmland soil via various *Sedum alfredii*-oilseed rape cropping systems: Efficiency comparison and cost-benefit analysis [J]. *J Hazard Mat*, 2021, 419: 126489. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126489.
- [24] SUN Y B, ZHOU Q X, DIAO C Y. Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. [J]. *Bioresour Technol*, 2008, 99(5): 1103–1110.
- [25] XIE Q, LI Z, YANG L, et al. A newly identified passive hyperaccumulator *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* under manganese stress [J]. *Plos One*, 2015, 10(9): e0136606.
- [26] DE O V, ANDRADE S A. Manganese accumulation and tolerance in *Eucalyptus globulus* and *Corymbia citriodora* seedlings under increasing soil Mn availability [J]. *New Forests*, 2021, 52(4): 697–711.
- [27] PROBST A, LIU H, FANJUL M, et al. Response of *Vicia faba* L. to metal toxicity on mine tailing substrate: Geochemical and morphological changes in leaf and root [J]. *Environ Exper Bot*, 2009, 66(2): 297–308.