

油页岩废渣场植物修复的生态效应

孔国辉¹, 刘世忠¹, 陈志东², 褚国伟¹, 余清发¹,
柯宏华², 夏汉平¹, 黄娟¹, 邓钊平², 敖惠修¹

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国石化集团茂名石油化工有限公司, 广东 茂名 525011)

摘要: 对广东茂名页岩油工业固体废物裸露灰渣地植林 18 a(南排)和 3-5 a(北排)后的植物生长、凋落物、土壤容重、有机质、pH 和植物多样性进行了对比调查和分析。结果表明, 南排和北排已形成了森林环境。土壤基质已得到了改善, 南排的凋落物现存量增加了 1.39 倍, 土壤有机质增加了 52.39%(0-20 cm)、50%(20-40 cm), 土壤 pH 值提高了 0.28 个单位。南、北排林地土壤 pH 值分别比植林前裸地提高了 0.99 个单位和 0.71 个单位。这说明植树造林对增加土壤有机质效果明显, 对提高土壤 pH 值则相对较慢。南排自堆放油页岩灰渣后, 45 a 来入侵定居的野生植物有 48 科 118 属 138 种, 其中草本植物占总种数的 54%, 乔木 15 种; 北排堆放 28 a 来, 有 24 科 63 属 66 种植物入侵定居, 其中草本种类占 67%。

关键词: 油页岩废渣; 植物修复; 生态效应

中图分类号: X 171.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2006)01-0061-08

Ecological Effect of Phytoremediation on Oil Shale Waste Dumps

KONG Guo-hui¹, LIU Shi-zhong¹, CHEN Zhi-dong², CHU Guo-wei¹, YU Qing-fa¹,
KE Hong-hua¹, XIA Han-ping¹, HUANG Juan¹, DENG Zhao-ping², AO Hui-xiu¹

(1. South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. Maoming Petroleum Chemical Company of Chinese Petroleum Chemical Company, Maoming 525011, China)

Abstract: The plant's growth, litterfall, soil bulk density, soil organic matter, pH and plant diversity were investigated in two oil shale waste dumps in Maoming, Guangdong Province. The south dump was afforested for 18 years, and the north for 3 to 5 years. The results showed that in the south dump, the standing litterfall production increased by 1.39 times, organic matter in soil at 0-20 cm depth by 52.39%, at 20-40 cm by 50%, and soil pH by 0.28 unit, as compared to the north dump. The pH in south and north dumps increased by 0.99 and 0.71 units, respectively, compared to the bare dump. The invading wild plants on the south dump amounted to 138 species in 118 genera of 48 families since oil shale waste dumping 45 years ago, and the north dump amounted to 66 species in 63 genera of 24 families since dumping 28 years ago.

Key words: Oil shale waste; Phytoremediation; Ecological effect

矿产资源开发利用所引起的环境污染问题受到了国内外广泛关注。矿业废弃物主要由矿物资源被提取后的残渣、碎小原矿石和原矿地表层剥落土组成。这类废弃物不但占用大量土地资源, 还向大

气排放 H₂S、SO₂ 等废气^[1], 影响矿区附近植物的生长发育^[2], 使地下水酸化^[3]或碱化^[4], 对环境的污染造成极深远影响^[5-7]。对矿区废渣场进行复垦的常规方法主要有 3 种^[8]: 一是直接在未处理过的废渣上栽

收稿日期: 2005-09-02 接受日期: 2005-11-23

基金项目: 中国石化茂名石油化工有限公司(1999-2003); 中国石化集团(2002-2005); 广东省环保局科技开发项目(2001-07)资助

为本研究的组织和领导作出特殊贡献的郑琪关高级工程师、梁朝高级工程师、李丽华高级工程师, 以及参与本项工作的杨帆工程师等, 谨致以诚挚的感谢。

种植物;二是先对废渣场进行适当处理,再栽种植物;三是采用表土覆盖法。但这些常规的恢复方法都难以使废渣场达到理想的恢复效果。近年来,国内外采用一些新的用于废渣场的生态恢复方法,如植物修复(phytoremediation)、生物降解(biodegradation)与生物强化(bioaugmentation)技术等^[9,10],效果显著。

我国是个油页岩资源丰富的国家,已探明和预测的油页岩储量为 4.83×10^{11} t,所含页岩油资源量 2.90×10^{10} t,居世界第 4 位。广东油页岩资源相当丰富,已探明储量 7.57×10^9 t,位居全国第二,其中茂名达 5.10×10^9 t^[11]。早在上世纪 50 年代,茂名就建造了以炼页岩油为主的化工基地。

中国石化集团茂名石化公司自 1955 年在茂名生产页岩油,生产过程中产生的干馏和燃烧后的半焦炭渣先后堆放于市区南北两处的废渣场(简称南排和北排),对城市景观和周围环境造成很大危害。为了改善废渣场恶劣的生态环境,对茂名的两大油页岩废渣场均采用植物修复技术进行生态恢复。油页岩废渣场生态环境恶劣^[7,12],要使之尽快修复,关键是在对其基质特性充分了解的基础上筛选出多种用途的适生植物(有关北排适生植物筛选结果另文报道),并利用这些植物对污染基质进行修复。自 1985 年在南排进行大规模的植树造林,种植速生、耐旱瘠的相思(*Acacia* spp.)、桉树(*Eucalyptus* spp.)、松树(*Pinus* spp.)等 16 种,共 57.55 万株乔木植物,到 1990 年南排废渣场已全部绿化^[3,13]。南排植林 9 a 后,废渣场基质上出现新成土,上层腐殖质积累,氮、磷含量均有所增加^[7],植林 16 a 后,土壤微生物总数比灰渣裸地提高了约 20 倍,脲酶、磷酸酶、蔗糖酶活性以及土壤呼吸速率都明显增强,土壤理化

性质也有所改善^[4]。在此基础上,本文报道南排栽种植物生长状况及物种多样性、环境效应方面的研究结果,同时对北排的植被恢复状况进行报道,尤其是植物修复的生态效应,为同类废渣场退化生态系统的恢复提供参考。

1 试验区环境

1.1 自然环境

广东省茂名市 ($21^{\circ}25' - 22^{\circ}42'N$, $110^{\circ}21' - 111^{\circ}46'E$)的茂南区,地处热带北缘,属热带季风海洋气候。年均温 $23.2^{\circ}C$,1 月平均气温 $15^{\circ}C$,最低气温 $1.7^{\circ}C$,全年无霜。7 月平均气温 $28.4^{\circ}C$,极端高温 $37.8^{\circ}C$ 。年均降雨量 1 567 mm,集中在 4-9 月,占全年降水量的 84%。

本区大部分为台地和平原,主要土壤类型有赤红壤、砖红壤和水稻土。地带性植被为热带季雨林,但已不复存在。次生植被为灌木草本,灌木常见的种类有大青(*Clerodendron cryptophyllum*)、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、了哥王(*Wikstroemia indica*)等;草本有飞机草(*Eupatorium odoratum*)、鹧鸪草(*Eriachne pallescens*)、纤毛鸭咀草(*Ischaemum indicum*)等。

1.2 油页岩废渣场试验地环境

废渣场堆置物由黑灰色的焦炭渣($500^{\circ}C$ 干馏后排出)、赤色的灰渣($800^{\circ}C$ 燃烧充分的灰渣)、褐色的岩渣(为碎小的油页岩)和剥离土(为油页岩矿表层土壤)所组成。灰渣中 Al_2O_3 及 SiO_2 的含量较高,而 CaO 与 MgO 的含量较低, Ca 趋于淋失, Al 趋于富集,灰渣水浸出液呈强酸性反应^[7]。由于废渣渣色深容易吸热,夏季在无植被的裸露地面,中午地表温

表 1 南、北排基本情况

Table 1 Information about oil shale waste dumps

	南排 South dump	北排 North dump
页岩油生产时间 Time of producing shale oil	1955-1993	1955-1993
岩渣堆放时间 Dumping time	1955-1975	1971-1993
废渣堆放面积 Dumping area (hm^2)	140 ^[3]	670 ^[3]
高度 Waste height (m)	20-30 ^[3]	20-30 ^[3]
种植种类 Numbers of species planted	主要有 16 种	引入筛选种类 172 种
植树数量 Number of individual plants	5.7×10^5	1.1×10^6
植树面积 Afforesting area (hm^2)	140	284.2
植树时间 Planting time	1985-1990	1987-2003

度可达 40℃。因岩渣堆放时间已长达 30 多年, 大部分地面已形成以禾本科植物为主的草地。南、北排基本情况如表 1。

2 参试植物和方法

2.1 参试植物

南排: 引种耐干旱的速生树种为主, 如相思、松类和桉类植物等共 16 种^[3]。

北排: 种源来自热带亚热带, 具有多种用途和特性的树种, 如有材用、油料、观花、观果、防火等性能。1999–2001 年间种植且生长较好、有推广意义的部分种类为: 红胶木(*Tristania conferta*)、云南石梓(*Gmelina arborea*)、铁刀木(*Cassia siamea*)、海南蒲桃(*Syzygium cumini*)、油榄仁(*Terminalia bellirica*)、海南红豆(*Ormosia pinnata*)、红荷木(*Schima wallichii*) 和非洲楝(*Khaya senegalensis*) 等。

2.2 方法

种植技术与管理 试验苗木为 1 a 生苗, 高 20–80 cm。筛选区用人工开穴种植, 穴大小为 50 cm×50 cm×60 cm(深), 每穴施放腐熟塘泥 5 kg, 土杂肥 2 kg, 复合肥 0.25 kg, 基肥与土充分拌匀。推广区用机械并行整地, 基肥与以上穴植相似, 株行距均为 2 m×2 m。因试验地缺水源, 在 4 月–5 月当地多雨季节, 掌握好在降雨或雨后 1–2 d 种植, 以满足小苗定植时对土壤水分的要求, 定植后无任何浇灌措施。

植物生长量观测 小苗种植成活后测量基径、株高、冠幅, 以后每年或定期(南排)测量, 树长高至 1.3 m 后, 增加胸径测量。

林木生长状况 用样方法调查。林木层(10 m×10 m)、灌木层(5 m×5 m)和草本层(2 m×2 m), 调查内容包括: 乔木每株调查株高、胸径、基径、冠幅, 灌木和草本层调查包括种类、个体数、株高、盖度。

植物多样性调查 草本植物自然演替的样地调查用 1 m×1 m 样方调查(北排); 样方调查与试验地无样方记名法相结合。

土壤化学分析 pH: 用电位法^[15]测定; 有机质: 重铬酸钾氧化 - 外加热法^[16]; 全氮: 酸溶 - 靛酚蓝比色法^[15]; 速效氮: 氯化钾浸提 - 靛酚蓝比色法^[16]; 全磷: 酸溶 - 比色法^[15]; 速效磷: 0.03 mol/L 氟化铵, 0.025 mol/L HCl 浸提 - 比色法^[16]; 全钾: 酸溶 - 原子吸收光度法^[15]; 速效钾: 1 mol/L 乙酸铵浸提 - 原子吸收光度法^[16]; 全铝: 酸溶 - ICP 测定^[15]; 土壤活性铝: 柠檬酸钠 - 连二亚硫酸钠 - 重碳酸钠浸提 - 铝试剂比色法^[17]; 交换性铝: 1 mol/L 氯化钾浸提 - 滴定法^[16]。

3 结果和分析

3.1 油页岩废渣场基质化学特征

3.1.1 pH、有机质和养分

油页岩废渣场堆置物(北排)的化学特性如表 2, 可见, 废渣场堆置物 pH 呈强酸性, K 含量较丰富, 有机质和水解氮较高, 但从三者的标准差值之大, 可看出取样点间含量差异甚大, 全氮和全磷含量较低。总体上看, 油页岩废渣场基质养分贫瘠。

3.1.2 重金属含量

北排基质重金属含量(表 3)均未超过国家二级标准, 但均超过茂名当地土壤环境背景值的中位值, 其中油页岩灰渣与碎小油页岩中 Cd 平均含量超过茂名当地土壤背景值 3.31 倍, 其他各种重金属含量亦超过 1.06–4.76 倍。

3.1.3 交换性铝含量

油页岩灰渣中铝含量较高, 故特对交换性铝含量作了多点采样分析(表 4), 其平均含量为 61.54 mmol kg⁻¹ (n=21), 变化范围为 43.08–73.75 mmol kg⁻¹。不同形态的铝对植物毒性不一样, 其中以土壤粘粒表面以静电引力吸附的交换态铝

表 2 北排油页岩废渣场基质养分

Table 2 Nutrient contents in north oil shale waste

	pH	有机质 (%) Organic matter	全量氮 Total N (%)	有效氮 Available N (mg kg ⁻¹)	全量磷 Total P (%)	速效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	全量钾 Total K (%)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)
平均值 Mean	4.01±0.24	4.19±4.71	0.084±0.08	62.2±35.16	0.071±0.05	2.03±2.18	1.004±0.49	106.78±114.8
变化范围 Range	3.74–4.52	0.4–11.84	0.007–1.85	28.2–120.4	0.01–0.14	0.1–5.4	0.32–1.77	10–332.8
n	8	6	6	6	7	6	7	6

表 3 北排基质重金属含量 (mg kg^{-1})
Table 3 Heavy metal concentration (mg kg^{-1}) of north oil shale waste dump

元素 Elements	基质种类 Kinds of matrix (0-20 cm)			国家标准 ^{[18]*} National Standard		茂名土壤环境 中位值 Median values of soil in Maoming ^{***}	广东省土壤环境 背景值 ^[19] 中位值 Median values of soil in Guangdong	最大值 Maximum value
	油页岩灰渣 Shale ash	碎小油页岩 Granulate shale	剥离土 Surface soil from shale	果园 Orchard	农田 Farmland			
Cu	34.95	28.44	12.52	150	50	10.5	11.4	98.7
Zn	104.61	98.3	24.36	200	—	22.0	35.8	227.5
Mn	178.59	156.13	43.94	—	—	72.0	151	2825
Ni	27.75	22.1	11.31	—	40	9.0	8.8	200.7
Pb	43.18	52.27	30.30	—	250	24.0	28.9	163
Cd	0.123	0.115	0.058	—	0.30	0.036	0.04	2.286
Cr	36.17	20	16.17	150	—	34.10	34.80	350.4

* 国家二级标准 Second class of National Standard; ** 广东省环境监测中心. 广东省土壤环境背景值数据集, 1990. Data from Collections of Soil Environmental Background for Guangdong Province, 1990, ed. by Environmental Monitoring Center of Guangdong Province.

表 4 茂名油页岩灰渣和当地砖红壤中交换性铝含量 (mmol kg^{-1})
Table 4 Concentration of exchangeable Al (mmol kg^{-1}) in oil shale waste and in local laterite in Maoming

土层深度 Soil depth (cm)	油页岩灰渣 Oil shale waste	废渣场附近荒地砖红壤 Laterite near waste dump
0-20	60.57±0.55	9.64±0.09
20-40	69.03±0.62	9.94±0.09
40-60	66.22±0.60	11.70±0.11
60-80	73.75±0.66	11.77±0.11
平均 Mean	67.40±5.51	10.76±1.13

(Al^{3+}), 对生物的危害最大^[20]。土壤中的 Al 的溶出量随着酸度的增加而增加, 且溶出铝中的 Al^{3+} 所占的比例逐渐增加, 而土壤中 Al 的溶解度主要受固相的铝矿物和氧化物所控制^[21]。在茂名油页岩灰渣中 Al_2O_3 所占的比例为 24%, 仅次于 SiO_2 (62%)^[22], 铝氧化物含量丰富, 为 Al^{3+} 的大量溶出提供了条件。从表 4 可见交换性铝含量平均值比当地砖红壤高 5.72 倍, 这亦说明, 油页岩灰渣中 Al_2O_3 含量比当地砖红壤丰富, 致使溶出的土壤交换性铝含量有从上层向下层逐渐增加的趋势。前人研究发现, 深层土

壤是 Al 的一个重要的“汇”, 表层土壤中各种形态的溶解 Al, 通过各种途径到达深层土壤或沉淀下来或渗入地表水中^[23], 表 4 显示土壤下层交换性铝含量高于上层, 本文的结果与前人研究结果相似。

3.2 植物生长状况

南排: 栽种树木成活率达 88%–98%, 森林覆盖率达 90%, 林木生长状况见表 5。

窿缘桉、大叶相思、湿地松三种林的林下幼树和灌木层高 2–3 m, 总盖度分别为 34%、28% 和

表 5 南排林木生长状况
Table 5 Tree growth on south oil shale waste dump

植物 Species	株高 Height (m)	胸径 Diameter breast high (cm)	密度 Density (plants hm^{-2})
大叶相思 <i>Acacia auriculaeformis</i>	13.29±3.21	13.05±3.26	1600
湿地松 <i>Pinus elliotii</i>	8.31±0.55	12.97±2.39	1750
窿缘桉 <i>Eucalyptus exserta</i>	15.53±3.06	15.14±4.22	875

种植时间: 1985 年 4 月, 调查时间: 2002 年 8 月; 样方面积: $4 \times (10 \text{ m} \times 10 \text{ m})$. Planting time: April, 1985; Investigation time: August, 2002; Sample area: $4 \times (10 \text{ m} \times 10 \text{ m})$

15.3%, 灌木优势种有马缨丹 (*Lantana camara*)、大青、梵天花(*Urena spp.*)等; 草本层盖度 60%–85%, 主要有飞机草、日本草 (*Borreria latifolia*)、倒扣草 (*Achyranthes aspera*)、金腰箭 (*Synedrella nodiflora*) 等。另外, 还有多种乔木定居, 如潺槁树(*Lüsesea glutinosa*)、土密树 (*Bridelia tometosa*)、竹节树 (*Carallia brachiata*)、山黄麻(*Trema orientalis*)等, 不

少已长成 2–4 m 高的幼树。

北排: 2004 年 8 月调查(栽种后 4–5 a), 生长较好的种类, 平均株高从不到 1 m, 已增至 4–7 m, 胸径达 5–11 cm, 基径从 0.29–1.52 cm 增至 10.24–18.14 cm。生长表现较好的种类见表 6。但发现所栽种的乔木种类中多数在其树干基部(距地面 50 cm 以下)长出分枝, 致使下部枝条接近或覆盖地表, 形

表 6 北排林木生长情况

Table 6 Tree growth on north oil shale waste dump

植物 Species	树高 Height		基径 Basal diameter		胸径 Diameter breast high (C) (cm)	综合增长指数 Synthetic increment index (A+B+C)	基部 50 cm 以 下分枝数 Branch numbers below 50 cm
	树高 Height (m)	增长倍数*** Increase times (A)	基径 Basal diameter (cm)	增长倍数*** Increase times (B)			
油榄仁 ^{***} <i>Terminalia bellirica</i>	4.86	30.38	10.24	35.31	7.00	72.69	0.0
海南红豆 ^{***} <i>Ormosia pinnata</i>	4.61	15.90	13.33	15.68	7.85	39.43	1.2
红胶木 ^{***} <i>Tristania conferta</i>	7.00	11.29	16.33	16.01	11.223	38.52	0.6
海南蒲桃 ^{***} <i>Syzygium cumini</i>	5.45	8.79	14.56	14.27	10.67	33.73	0.2
铁刀木 ^{***} <i>Cassia siamea</i>	5.26	11.19	14.21	14.07	6.39	31.65	2.6
红荷木 ^{***} <i>Schima wallichii</i>	4.36	6.81	15.38	15.54	7.96	30.31	1.2
云南石梓 ^{***} <i>Gmelina arborea</i>	5.28	6.77	18.14	11.93	6.59	25.29	3.4
非洲楝 ^{***} <i>Khaya senegalensis</i>	4.16	8.00	10.69	9.97	5.22	23.19	1.2

种植时间: * 1999 年 5 月; ** 2000 年 5 月. Planting time: * May, 1999 ** May, 2000; 调查时间: 2004 年 9 月 20 日, n=10. Investigation time: September 20 th, 2004, n=10; *** 以 2000 年 5 月为起始的株高和基径计算 Tree height and basal diameter are initiated from those in May, 2000.

成了长球形或圆锥状、圆柱状树冠, 这种现象的发生机理还有待进一步研究。

3.3 植被恢复对油页岩废渣土的改良效应

3.3.1 凋落物及土壤容重的影响

植树造林后上层林木及林下层灌木、草本植物大量的凋落物为基质的改良提供了有机物的来源, 改善了原有基质的物理结构(表 7), 植林 18 a 的南排比植林 4 a 的北排平均凋落物现存量增加了 1.39 倍。北排新植林的凋落物现存量比自然演替 32 a 的草地稍低。凋落物的增加使土壤变得较疏松, 容重降低, 如经植树 18 a 的南排 0–20 cm 的土壤容重(0.98 g cm³, 下同)比植树 4 a 的北排(1.04)要轻, 20–40 cm 土层亦为南排(0.96)较北排(1.09)为轻, 无论是南排和北排, 其 0–20 cm 及 20–40 cm 土壤平均容重均较自然演替 32 a 的草地为轻。

3.3.2 土壤有机质含量的影响

植被恢复增加土壤有机质含量, 而且随着植林时间的增加, 有机质含量越高。植树 18 a 的南排土

壤有机质含量平均达 11.81% (0–20 cm) 和 11.25% (20–40 cm), 而植树 3–4 a 的北排土壤有机质含量均值仅 7.75% (0–20 cm) 和 7.50% (20–40 cm), 它们与各自的废渣场天然入侵草地相比较, 有机质含量分别增加了 100.85% (0–20 cm)、99.47% (20–40 cm) 和 74.90% (0–20 cm)、2.30% (20–40 cm)。无论是南排还是北排, 废渣场天然入侵草地有机质的含量均较低, 南排平均为 5.88%, 比北排(4.43%)稍高。但废渣场自然入侵草地的土壤有机质含量(5.88%)高于当地砖红壤天然杂草地(0.97%)。这说明废渣地比当地自然土更利于天然草本植物群落的生长。废渣土中的有机质含量差异较大, 如铁刀木和云南石梓林地的有机质含量均较低, 在 0–20 cm 和 20–40 cm 仅分别为 2.44%、2.25% 和 3.09%、3.48%, 在采样时发现, 这两林地含剥落土(油页岩开采前的表土)成分较多, 而该基质的有机质含量比废渣有机质含量要低^[2], 这可能是导致铁刀木和云南石梓林地有机质较低的最主要原因。

表 7 凋落物现存量及油页岩灰渣土容重^{*}

Table 7 Standing litterfall production and bulk density of soil under forest grown in oil shale waste

地点 Sites	上层植物 Upper stratum species	种植时间 Planting time	凋落物现存量 Litterfall production (t hm ⁻²)	土壤容重 ^{**} Bulk density (g cm ³)	
				0-20 cm	20-40 cm
南排 South waste dump (a)	尾叶桉 <i>Eucalyptus urophylla</i>	1985 (18 a)	6.38±0.12	0.97±0.07	0.95±0.05
	大叶相思 <i>Acacia auriculaeformis</i>	1985 (18 a)	4.60±0.17	0.97±0.11	0.99±0.10
	湿地松 <i>Pinus elliottii</i>	1985 (18 a)	6.25±0.15	1.01±0.13	0.95±0.03
	均值 Average	—	5.74±0.99	0.98±0.02	0.96±0.02
北排 North waste dump (b)	海南红豆 <i>Ormosia pinnata</i>	2000 (3 a)	3.48±1.35	0.93±0.19	1.10±0.20
	灰毛豆 <i>Tephrosia candida</i>	2000 (3 a)	3.48±1.35	—	—
	樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	1999 (4 a)	—	1.11±	1.00±0.15
	云南石梓 <i>Gmelina arborea</i>	2000 (3 a)	—	1.08±0.07	1.17±0.13
	均值 Average	—	4.13±0.92	1.04±0.10	1.09±0.09
北排油页岩灰渣地 North ash dump	自然入侵草(对照)	1971-2003 (32 a)	4.57±1.88	1.09±0.05	1.18±0.17

^{*} 调查时间:2003 年 12 月; Investigation time: December of 2003; 取样面积: a: 2 m × 2 m n=15; b: 0.1 m × 0.1 m, n=20. a and b represent sampling areas of 2 m × 2 m (n=15) and 0.1 m × 0.1 m (n=20), respectively. ^{**} 用环刀法取样 Sampled by cutting ring

3.3.3 土壤 pH 值的影响

随着树木生长年龄的延长,土壤酸碱度有升高的趋势。南排 0-20 cm 土层各树种(大叶相思、尾叶桉、湿地松,下同)平均 pH 值为 5.00,比北排(树种为铁刀木、海南红豆、云南石梓,下同)(4.77)升高 0.23 单位,而 20-40 cm 土层 pH 值则两处差别不大,南排平均为 4.73,北排平均为 4.74。植树后南排与北排分别比废渣场自然入侵草地升高了 0.99 和 0.76 个单位(0-20 cm),土壤上层的 pH 值比下层稍高。北排植树前的天然草地土壤 pH 值比废渣土高 0.57 个单位,即从废渣土发展成自然演替的草地经历了 32-33 a,其 pH 值才提高了 0.57 个单位;植树后南、北排土壤 pH 值与废渣土比较,分别提高了 0.42 个单位(以下同)(0-20 cm)、0.18 (20-40 cm),和 0.19 (0-20 cm 和 20-40 cm 均同)。总的来说,通过植树造林来提高南、北排废渣地的 pH 值,速度是十分缓慢的。

3.4 植被恢复促进物种多样性发展

据对南排和北排自然定居植物种类的调查,先锋种以禾本科、莎草科和菊科种类为主,随后灌木、乔木种类增加。在北排,草本植物种类多,有 44 种,占总定居种类总数的 66.67%,其次为灌木,13 种,占 19.69%,第三为藤本,7 种,占 10.61%,小乔木仅 2 种;南排的植物种类较北排丰富,但仍以草本居多,有 75 种,占定居总种数的 54.35%,其次为灌木,39

种,占 28.26%,小乔木有 10 种,且有乔木树种出现,如乌桕 (*Sapium sebiferum*)、无患子 (*Sapinus mukorossi*)、椴叶吴茱萸 (*Evodia glabrifolia*)、鸭脚木 (*Schefflera actionphylla*) 和倒吊笔 (*Wrightia pubescens*) 等 5 种。废渣场先锋种类的定居为后续种类的入侵和定居创造了条件,也为土壤微生物、土壤动物种群和数量的发展创造了良好环境^[14, 24]。生物多样性的丰富,反过来又促使恶劣生态环境逐步得到改善。

虽然本试验未能知道从裸露废渣地到开始有植物定居的时间及其入侵过程,但从岩渣开始堆放至停止,南、北排分别经历了 45 a 和 29 a,期间入侵定居的植物科、属、种的数量在南排为:48:118:138,北排为 24:63:66。南排现有的野生植物种数比北排增加了 2.10 倍。在此期间,南排和北排平均每年增加的植物种数仅约 2-3 种,天然植物的自然恢复过程还是比较缓慢。

4 讨论

4.1 北排部分乔木树种出现基部低位分枝原因值得探讨

北排参试植物中约 66% 的树种在低于树干 50 cm 以下出现许多分枝,而且在一些树种中分枝大小与其主干相近。据文献报道,过高的交换性铝含量会对植物的根系产生伤害,并由此导致根系对

水分和养分的吸收能力下降,引起植物体内激素合成失去平衡,叶面积指数下降、生物量减少等,最终导致植株矮化,分枝增多^[25-28],如铝对马尾松根、茎生长均有明显的抑制作用^[29],桉树幼苗株高生长亦受到铝抑制^[30];Cd 的活性明显受土壤溶液酸碱度影响^[31],Cd 在植物体积积累到一定程度,就会使植物出现生长迟缓,植株矮小,产量下降等症状^[32]。北排废渣土 pH 值为强酸性 (3.74-4.52), 交换性铝含量 (67.4 mmol kg⁻¹) 也比当地砖红壤高出 6.3 倍。北排引种植物的矮化和基部出现分枝是否与废岩渣中铝、镉含量高有关,或与油页岩废渣中某些对植物有害的化学成分有关,尚待进一步研究。

4.2 页岩油工业废渣宜林性

页岩油生产过程所产生的废渣除酸性强, 铝、镉含量较高外, 灰渣中铀、钍含量均高于广东土壤背景值的中位值, 但仍在自然背景值范围^[4]。基质中磷、钙、镁含量低, 不利植物生长。但从灰渣的贮水、保水性能看, 废岩渣比当地自然土砖红壤强, 据冬、夏季对两种基质含水量测定, 前者比后者高出 50%-60%, 这对于当地较干旱的环境, 能保持较多水分, 十分有利于植物生长。故只要选择对酸、铝、镉不敏感的植物, 以及辅以降低基质酸性的措施, 如施加石灰及碱性肥料等, 废渣场是一很好的宜林地。但是, 废渣场的恢复是否成功, 不能只考虑其种植植物的生长情况, 还需着重考虑植林地不同生物组成成分之间的协调关系, 以及逐渐形成的生态系统功能的维持等方面。美国生态学家 Ewel^[33]认为, 新建生态系统的持续性, 较高的生产力, 较高的养分保持能力和生态系统中不同生物组成成分之间的协调关系, 均是评价退化生态系统得到成功恢复的标志。所以, 茂名油页岩废渣场的恢复实践还有待进一步持续观测和检验。

4.3 页岩油工业废渣的处理和利用方向问题

茂名油页岩废渣的处理过去主要是从环境保护观点出发, 用绿化造林措施使其尽快复绿, 改善景观。但近几年来有利用灰渣作制砖的填充料, 因而挖取废岩渣不止; 近期因体制改革, 出现另一种利用方式, 砍去已有的相思林、松林, 重新种植速生丰产桉树, 把废渣场作为纸浆林基地, 若干年后采伐一次, 如此轮回。经济效益、环境效益、社会效益如何统一, 在社会经济高速发展的今天, 这是一个亟待研究的问题。因能源紧缺, 油页岩的开发利用

已受到重新重视, 重新开发利用油母页岩正在规划和实践中, 大量废岩渣将继续产生是必然结果。废岩渣若能全部转化为某些工业的原料那是最理想的, 但若仍有剩余, 则仍需占用大量土地堆放, 造成水、土、气、生态环境污染。因此, 如何科学处理和合理利用油页岩废渣是个值得讨论和具现实意义的课题。

参考文献

- [1] Chen Z C(陈志澄), Yang B Y(杨冰仪), Zhou Y H(周永红), et al. Studies on the influence of mine exploitation on the formation of acid rain [J]. Chin Environ Sci(中国环境科学), 2002, 22(3):222-226.(in Chinese)
- [2] He X B(何兴兵), Wei H(魏虹), Lin Y H(林永慧), et al. Effects of exploiting aluminum mine on the development of vegetation in Zengziyan of Jinpo Mountain [J]. Ecol Sci(生态科学), 2003, 22(1): 50-53. (in Chinese)
- [3] Deng Z P(邓钊平), Li L H(李丽华), Liang C(梁朝). Experimental investigation on the reuse of resource in Maoming, Guangdong, oil shale disposal [J]. Ecol Sci(生态科学), 2000, 19(4):57-61.(in Chinese)
- [4] Gu J F(谷金锋), Cai T Y(蔡体元), Xiao Y(肖洋), et al. Vegetation restoring of desert land in industrial mining area [J]. J Northeast For Univ(东北林业大学学报), 2004, 32(3):19-22.(in Chinese)
- [5] Su W S(束文圣), Ye Z H(叶志鸿), Zhang Z Q(张志权), et al. Restoration of lead and zinc mine tailings in South China [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 2003, 23(8):1629-1639.(in Chinese)
- [6] Li Y G(李永庚), Jiang G M(蒋高明). Ecological restoration of mining wasteland in both China and abroad: an over review [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 2004, 24(1):97-100.(in Chinese)
- [7] Xu J L(许嘉琳), Liu H(刘虹), Jing H W(荆红卫), et al. Environmental remediation for the shale oil industrial solid wastes dumping area through forestation [J]. Acta Sci Circum(环境科学学报), 2000, 20(Suppl (9)):133-139.(in Chinese)
- [8] Redente E F, Hower J M, Barnhiser R I. Reclamation of oil shale [A]. In: Reclamation of Drastically Disturbed Lands, Agronomy Monograph Vol. 41 [C]. Madison WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2000. 775-799.
- [9] Truu J, Talpsep E, Vedler E, et al. Enhanced biodegradation of oil shale chemical industry solid wastes by phytoremediation and bioaugmentation [J]. Oil Shale (Special), 2003, 20(3):421-428.
- [10] Truu J, Kärme L, Talpsep E, et al. Phytoremediation of solid oil shale waste from the chemical industry [J]. Acta Biotechn, 2003, 23(2-3):301-307.
- [11] Zhang J Q(张家强), Wang D J(王德杰). <http://www.drc.cgs.gov.cn> [DB/OL]
- [12] Liu S Z(刘世忠), Xia H P(夏汉平), Kong G H(孔国辉), et al. The soil and vegetation of oil shale dump in Maoming city, Guangdong Province [J]. Ecol Sci(生态科学), 2002, 21(1):25-28.(in Chinese)

- [13] Xia H P(夏汉平), Huang J(黄娟), Kong G H(孔国辉). Ecological restoration of oil shale waste dumps [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2004, 24(12):2887-2893. (in Chinese)
- [14] Deng W Q(邓旺秋), Pan C M(潘超美), Li T H(李泰辉), et al. Ecology of soil microorganisms in shale wastes dumping area during rehabilitation through forestation [J]. *Chin J Appl Environ Biol(应用与环境生物学报)*, 2003, 9(5):522-524. (in Chinese)
- [15] Dong M(董鸣). Survey, Observation and Analysis of Terrestrial Biocommunities [M]. Beijing: Standard Press of China, 1996. (in Chinese)
- [16] Liu G S(刘光蕊). Soil Physical and Chemical Analysis Discription of Soil Profiles [M]. Beijing: Standard Press of China, 1996. (in Chinese)
- [17] State Forestry Administration(国家林业局). Forestry Industrial Standard of People's Republic of China [M]. Beijing: Standard Press of China, 1999. (in Chinese)
- [18] GB 15618-1955, National Standard Values of Soil Environmental Quality [S]. (in Chinese)
- [19] China National Environmental Monitoring Center(国家环境监测总站). The Background Values of Soil Elements in China [M]. Beijing: Chinese Environment Science Press, 1990. (in Chinese)
- [20] Huang Y C(黄衍初), Qu C L(曲长菱). Studies on the leaching and species of aluminum in soil [J]. *Environ Sci(环境科学)*, 1996, 17(1):57-59, 95. (in Chinese)
- [21] Xu R K(徐仁扣), Ji G L(季国亮). Influence of pH on dissolution of aluminum in acid soils and the distribution of aluminum ion in species [J]. *Acta Pedol Sin(土壤学报)*, 1998, 35(2):162-171. (in Chinese)
- [22] Wang J X, Wu J L, Wang H Q, et al. Agricultural utilization of Maoming oil shale ash [J]. *Oil Shale*, 1998, 15(4):316-328.
- [23] Zhu X, Pawlowski L, Kotowski M, et al. Mechanism of aluminum mobilization in soils [J]. *J Ecol Chem*, 1994, 3(3):169-194.
- [24] Liao C H(廖崇惠), Li J X(李健雄), Yang Y P(杨悦屏), et al. Species composing and diversity of soil faunain in oil shale waste dumpings in Maoming [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2005, (in press). (in Chinese)
- [25] Rengel Z. Role of calcium in aluminum toxicity [J]. *New Phytol*, 1993, 121:499-513.
- [26] Sierra J, Noel C, Dufour L, et al. Mineral nutrition and growth of tropical maize as affected by soil acidity[J]. *Plant Soil*, 2003, 252(2): 215-226.
- [27] Xu Y F(许玉凤), Cao M J(曹敏建), Wang W Y(王文元), et al. Advance in studies on aluminum toxicity and plant resistance [J]. *J Shenyang Agri Univ(沈阳农业大学学报)*, 2002, 33(6):452-455. (in Chinese)
- [28] He L F(何龙飞), Shen Z G(沈振国), Liu Y L(刘友良), et al. Studies on the mechanisms of aluminum toxicity in higher plant [J]. *J Guangxi Agri Biol Sci(广西农业生物科学)*, 2002, 21(3): 188-194. (in Chinese)
- [29] Gao J X(高吉喜), Cao H F(曹洪法), Sun D L(孙德玲), et al. The research of effects of aluminum on the growth of *Pinus massoniana* [J]. *Chin Environ Sci(中国环境科学)*, 1992, 12(27):118-121. (in Chinese)
- [30] Yang Z D(杨振德), Fang Z R(方小荣), Mou J P(牟继平). Effect of aluminum on the growth and some physiological characters of *Eucalyptus* seedlings [J]. *Guangxi Sci(广西科学)*, 1996, 3(4):30-33. (in Chinese)
- [31] Wang X(王新), Wu Y Y(吴燕玉). Effect of modification treatments on behaviour of heavy metals in combined polluted soil [J]. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 1995, 6(4):440-444. (in Chinese)
- [32] Zhang Y X(张义贤). Toxicity of heavy metals to *Hordeum vulgare* [J]. *Acta Sci Circum(环境科学学报)*, 1997, 17(2):199-204. (in Chinese)
- [33] Ewel J J. Restoration is the ultimate test of ecological theory [A]. In: Jordan W R III, Gilpin M E, Aber J D. *Restoration Ecology* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1987. 31-33.