

城郊森林低效林精准提升改造研究^{*} ——以深圳市罗湖区低效林改造工程为例

魏玉晗¹ 李毓琦² 赵庆²

(1. 广东省岭南院勘察设计有限公司, 广东 广州 510599; 2. 广东省森林培育与保护利用重点实验室/
广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要 为明确桉树林 *Eucalyptus robusta*、马占相思林 *Acacia mangium* 等低效林的改造效果, 研究以深圳市罗湖区低效林改造工程为实例, 在各改造地块布设 30 m×30 m 样方, 对生长表现较好的 6 个生态型改造树种地上部分生长、细根生物量和土壤理化性质进行分析, 结果表明: 0~18 个月内, 山杜英 *Elaeocarpus sylvestri* 一直保持较高的树高增长速度; 山杜英、假苹婆 *Sterculia lanceolata* 和尖叶杜英 *Elaeocarpus rugosus* 的地径生长具有明显优势; 尖叶杜英的冠幅面积在 6 个树种中表现最优; 假苹婆和铁冬青 *Ilex rotunda* 的树冠叶面积指数增长速度逐渐降低; 假苹婆的细根生物量持续升高; 有效氮、速效钾以及土壤有机质在改造后 18 个月, 有显著的提升。尖叶杜英、山杜英和假苹婆树冠绿量快速增加, 并保持较为通透的形式, 可以较好地适应深圳等台风高发的滨海城市。

关键词 低效林; 绿美广东; 城郊森林; 改造

中图分类号: S756 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2024) 03-0009-07

Research on Low-efficiency Suburban Forest Targeted Reconstruction: A Case Study of Low-efficiency Forest Renovation Project in Luohu District of Shenzhen

WEI Yuhan¹ LI Yuqi² ZHAO Qing²

(1. Guangdong Lingnanyuan Exploration and Design Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510599, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract To elucidate the growth effects of low-efficiency forests, such as *Eucalyptus robusta* and *Acacia mangium* after reconstruction, it could provide a basis for selecting tree species to enhance the ecological landscape benefits of suburban forests. As a case study of a renovation project on low-efficiency forests in Luohu District of Shenzhen, 30 m×30 m quadrates were arranged in each transformed plot. The above-ground growth, fine root biomass, and soil physicochemical properties of 6 ecotype tree species with good growth performance were analyzed. The results revealed that over a period of 0 to 18 months, *Elaeocarpus sylvestris* exhibited consistently high rates of tree growth. *Elaeocarpus sylvestris*, *Sterculia lanceolata* and *Laeocarpus rugosus* displayed notable advantages in ground diameter growth. Among the six species, *Elaeocarpus rugosus* had the lar-

^{*} 基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2022KJCX009)。

第一作者: 魏玉晗 (1987—), 女, 高级工程师, 主要从事风景园林规划设计、城市林业设计, E-mail: 359905191@qq.com。

通信作者: 赵庆 (1985—), 男, 正高级工程师, 主要从事城市林业、风景园林研究, E-mail: zhaoqing@sinogaf.cn。

gest crown area. The exponential growth rate of crown leaf area gradually decreased for *Sterculia lanceolata* and *Ilex rotunda*. *Sterculia lanceolata* demonstrated continuous increases in fine root biomass. AN, AK and SOM increased significantly improvement within 18 months after modification. Furthermore, the crown green quantity of *Elaeocarpus sylvestri*, *Sterculia lanceolata* and *Elaeocarpus rugosus* increased rapidly while maintaining a more transparent form which better suited them to withstand frequent typhoons experienced in coastal cities like Shenzhen.

Key words inefficient forest; green beauty Guangdong; sub-urban forest; transformation

城郊森林是城市森林的重要组成部分^[1], 具有改善城市小气候, 为市民提供休息, 森林游憩场所的生态功能^[2-3]。城郊森林位于城市周边, 拥有独特的森林景观, 良好的生态环境, 是人们走进森林, 亲近自然的重要区域^[4-5]。在对城郊森林景观改造过程中, 开展森林结构调整, 功能提升和格局优化等措施, 从而增强森林景观健康度, 优化生态环境, 提高森林生态效益和景观效益, 符合市民对美好生态追求的愿望^[6]。

2022 年 12 月, 广东省委十三届二次全会通过《中共广东省委关于深入推进绿美广东生态建设的决定》, 文件强调着重推进绿美广东生态建设重点任务, 围绕森林质量精准提升, 城乡一体绿美提升, 绿美保护地提升, 绿色通道品质提升, 古树名木保护提升, 全民爱绿植绿护绿等六大行动, 其中低效林改造也是森林质量精准提升的重要工作内容之一。根据《深圳市森林质量精准提升工程实施方案》的要求, 通过实施低效林改造工程建设, 进一步优化森林林分结构, 提高森林质量, 改善生态环境, 提升罗湖城市品质^[7], 形成“结构优、健康好、景观美、效益高”的可持续发展森林生态系统^[8], 进而达到森林质量精准提升目的, 巩固国家森林城市建设成果。

研究以深圳市罗湖区 2019 年低效林改造项目为实例, 探究城郊森林低效林改造的有效技术措施, 提出以构建结构稳定、多层次、多色彩城郊森林景观和较高生态服务功能的城郊森林为主旨的改造方法, 以期为建设“世界著名花城”^[9-10], 维护深圳大都市圈城市森林稳定^[11]做出贡献, 为华南地区低效林的林分改造和“绿美广东生态建设”提供科学指导。

1 研究概况

1.1 自然概况

罗湖区地处位于深圳市东南部, 属亚热带

海洋性季风常绿阔叶林区^[12-13], 日照充足, 降水丰富, 气候温和湿润, 植物四季长青; 年平均气温 23.0℃, 最低气温 1.4℃, 最高气温 37.6℃; 年平均降水量 1 935.8 mm, 每年的农历 5 月至 9 月为降水集中期, 东部降雨量多于西部^[14]。罗湖区土壤以赤红壤为主, 土层厚度在 80~150 cm 之间, 土壤较为贫瘠, pH 值在 5.83~6.28 之间。

1.2 林地现状与区位分析

项目位于深圳市布心山郊野公园内, 地块分布于省立绿道 2 号线(淘金山二线巡逻路段)两旁的林地, 其中丹平高速隧道贯穿布心山郊野公园山体, 靠近深圳水库, 毗邻梧桐山景区, 是深圳市绿地系统生态格局中东西贯通、陆海相连的关键通道, 生态区位极其重要^[15]。

1.3 改造范围与技术要求

为促进具有地带性生态景观特色森林群落的恢复, 优化森林结构, 提高森林质量, 需要对现有低效林分进行改造建设, 主要针对原有林地内的桉树林 *Eucalyptus robusta*、马占相思林 *Acacia mangium*、大叶相思林 *Acacia auriculiformis* 进行改造, 最终确定改造范围 82.11 hm², 主要集中在深圳水库的西北部, 划分为 8 个改造作业地块(图 1)。



图 1 低效林改造地块分布

Figure 1 Low efficiency forest transformation plot distribution

围绕淘金山绿道和绿道各个节点，综合考虑改造小班的景观视线以及原有林分的衰退程度，采用“勾、点、染”的自然手法，选择山体成片的低效林进行改造，设计既具有水土保持能力，又具有观花、观叶等效果的主题树种，营造“层林尽染”的森林景观^[16]。改造方法为“群团”模式，采取“景观型树种+生态型树种”的组合方式，形成多树种、多形式、多类型具有一定灵活性和稳定性的人工林分群落。既保证了低效林改造后的森林群落稳定性^[17]，同时又突出主题设计。

为凸显设计主题，选择黄花风铃木 *Handroanthus chrysanthus*、红花风铃木 *Tabebuia pentaphylla*、紫花风铃木 *Handroanthus impetiginosus* 等，加上宫粉紫荆 *Bauhinia variegata* 为景观型树种，同时延续梧桐山大区域的特色植物景观^[18]。以荷木 *Schima superba*、樟树 *Camphora officinarum*、山杜英、火力楠 *Michelia macclurei*、假苹婆、深山含笑 *Michelia maudiae* 等生态型树种为基底，打造多姿多彩的城市森林景观特色，达到“看风铃木，就到淘金山绿道”的效果（表 1）。

表 1 罗湖区低效林改造树种

Table 1 A list of tree species for low-efficiency forest transformation in Luohu district

作业地块 Homework	改造面积/hm ² Transformation area	景观型树种 Landscape tree species	生态型树种 Ecological tree species	样方个数 Sample quantity
A	22.01	紫花风铃木、宫粉紫荆	樟树、红锥、火力楠、深山含笑、灰木莲 <i>Manglietia glauca</i> 、山杜英、荷木	4
B	1.40	黄花风铃木、宫粉紫荆	樟树、荷木、华润楠 <i>Machilus chinensis</i> 、假苹婆、铁冬青	1
C	1.72	黄花风铃木、宫粉紫荆	樟树、火力楠、尖叶杜英、铁冬青、荷木、火焰木、深山含笑、假苹婆	1
D	16.93	黄花风铃木、宫粉紫荆	樟树、火力楠、荷木、格木 <i>Erythrophleum fordii</i> 、铁冬青、尖叶杜英	3
E	11.18	红花风铃木、宫粉紫荆	樟树、荷木、秋枫 <i>Bischofia javanica</i> 、铁冬青、短序润楠 <i>Machilus breviflora</i> 、假苹婆、米老排、火焰木、	3
F	6.41	宫粉紫荆、毛棉杜鹃	樟树、火力楠、荷木、短序润楠、华润楠、山杜英、假苹婆、红苞木、深山含笑	2
G	11.53	宫粉紫荆、仪花 <i>Lysidice rhodostegia</i>	樟树、火力楠、荷木、红锥、华润楠、假苹婆、楝叶吴茱萸 <i>Evodia glabrifolia</i> 、尖叶杜英、红苞木	3
H	10.93	黄花风铃木、宫粉紫荆	荷木、樟树、华润楠、红楠 <i>Machilus thunbergii</i> 、秋枫、深山含笑	3

对改造地块内坡度平缓地块（A、B、C 和 H）按行距 3.5 m×4.0 m 定植穴，挖穴规格为 60 cm×60 cm×50 cm，采用带状清理。坡度较陡地块（D、E、F 和 G）按行距 4 m×4 m 定植穴，挖穴规格为 80 cm×80 cm×50 cm，块状清理。林地种植带范围内部分杂草影响林木生长^[19]，清理至林地边缘，注意保留全部乔木和灌木（过密地段的灌木可适当疏枝）。景观型苗木选用胸径 4~5 cm、苗高 2.5 m 以上，冠幅 1.5 m 以上，假植两年以上，生长健壮的容器苗。生态型苗木选用生长健壮的 2 年生一级无纺布容器全冠苗，保证苗高 1 m 以上，地径 0.8~1.0 cm，栽植时营养袋及土球完整。每一树种 3 株品字型相邻种植，呈现出小丛状不等边三角形的种植形式，林

分整体上最后形成“小群落、大混交”的近自然式的配置模式。人工更新改造的作业小班树种配置采用等比例混交方式。

2 指标测定

本研究主要针对改造后的低效林，对生态型改造树种的地上部分生长、细根生物量和土壤理化性质进行分析。2023 年 4 月造林完成后 1 个月，在各改造地块内布设 30 m×30 m 的样方，按照小于 6 hm² 设立 1 个样方，6~10 hm² 设立 2 个样方，11~20 hm² 设立 3 个，大于 20 hm² 设立 4 个样方，共计 20 个样方，样方分布如表 1。对每个样方的苗木进行每木检尺，存活数量相对较高，同时生

长表现较好的树种为樟树、荷木、假苹婆、山杜英、尖叶杜英和铁冬青。在改造后 1 个月、6 个月、12 个月和 18 个月时，对其进行生长监测，获取地径、高度、冠幅、叶面积指数（因考虑苗木初值时，叶量较少，因此该指标仅测定改造 6 个月以后）、苗木根系（测定改造 6 个月以后）、土壤理化性质（改造前和改造后 18 个月）等数据。

2.1 地径

采用游标卡尺测量地径 D (cm)，起量部位是距离地面以上 2 cm 处，主尺上刻度线与卡尺脚夹住苗木的接触点最接近的刻度数即为苗木的地径。

2.2 树高

采用标尺测量树高 H (m)。将标尺的一端对齐苗木根部的作为起始位置，并确保标尺平稳地放置在水平的表面上，将标尺的刻度线与苗木的末端对齐，并记录与末端对齐的刻度，得到的刻度即为树木的高度。

2.3 冠幅面积

采用卷尺测量冠幅面积 CD (m^2)，首先记录南北方向宽度并记录数值，然后记录东西方向宽度并记录数值，通过东西方向和南北方向宽度的记录数值求平均值后，根据求圆面积公式获得冠幅面积。

2.4 叶面积

叶面积指数 LAI 使用 CI-110 植被冠层分析仪进行测定。

2.5 细根生物量

在各样方内，每个树种随机选取 3 株进行采样，利用不锈钢取土器对每株树的细根分深浅、远近分层采样，浅层：0~10 cm，中层：10~20

cm，深层：20~30 cm。近：0~15 cm，远：15~30 cm^[20]，带回实验室挑出细根，65℃ 烘干 72 h 后进行称量计算。

2.6 土壤理化性质

在各个改造造林地块所设样方内，于改造前与改造后 18 个月时用圆柱形土壤采样芯分别取土 2 kg，深度 30 cm。将采集的土壤带回实验室对其理化性质进行测定^[21] 和分析：物理性质指标包括土壤含水量 (SMC, %)，土壤总孔隙度 (Stp, %)，土壤毛管孔隙度 (Scp, %)，非毛管孔隙率 Sncp (%), 单位容积质量 BD ($g \cdot cm^{-3}$)；化学性质指标包括：全氮 TN ($g \cdot kg^{-1}$)，全磷 TP ($g \cdot kg^{-1}$)，全钾 TK ($g \cdot kg^{-1}$)，有效氮 AN ($mg \cdot kg^{-1}$)，速效磷 AP ($mg \cdot kg^{-1}$)，速效钾 AK ($mg \cdot kg^{-1}$)，pH 值，土壤有机质 SOM ($g \cdot kg^{-1}$)。

3 改造效果与分析

3.1 地上部分生长分析

每个样方内进行每木检尺，得出存活数量最多的 6 个树种，分别为樟树、荷木、假苹婆、山杜英、尖叶杜英和铁冬青。6 个树种树高、地径变化如图 2 所示：改造后 6 个月时，6 个树种平均树高均超过 1.5 m，其中山杜英和尖叶杜英树高达 2 m 以上；改造后 12 个月时，山杜英仍保持较高树高增长速度，平均树高达到 3.01 m，12 个月到 18 个月期间，尖叶杜英的树高增长加快，其他树种的树高增长均呈现减缓趋势；改造后 18 个月时，除香樟外，其他树种的平均树高均在 2.5 m 以上，其中山杜英的平均树高最大，为 3.36 m。

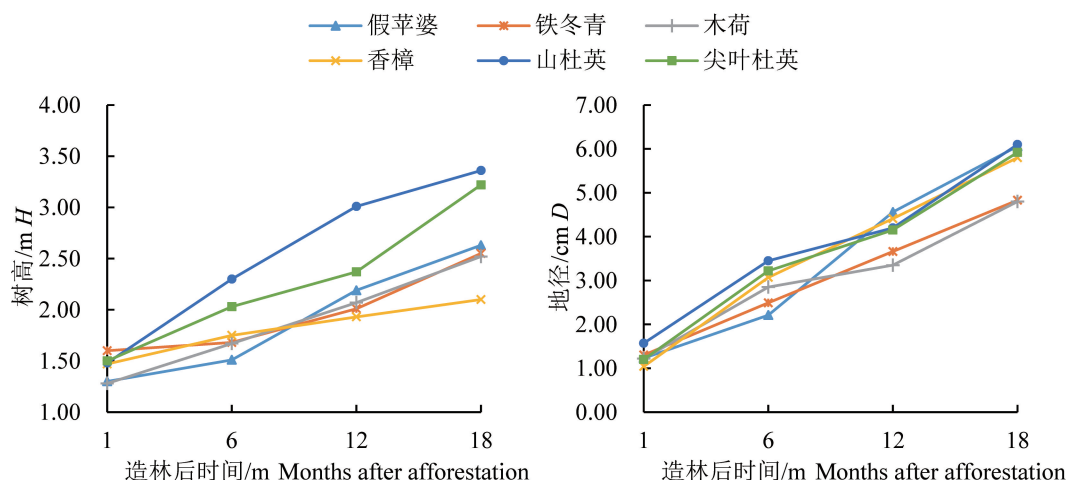


图 2 6 个树种树高、地径变化
Figure 2 Change of tree height and ground diameter of six tree species

改造后6个月时,6个树种的地径均在2 cm以上;12个月时,6个树种的地径在2.0~4.5 cm之间;18个月时,除铁冬青和木荷以外,其他树种的平均地径均在5 cm以上,其中山杜英、假苹婆和尖叶杜英的地径生长具有明显优势,分别达6.10、6.06、5.92 cm;铁冬青、木荷地径生长欠佳,仅达4.83和4.80 cm。

冠幅变化如图3所示,造林后6个月时,各树种的平均冠幅均集中在0.6~1.5 m之间,冠幅面积在0.5~1.5 m²范围内,其中冠幅面积在1 m²以上的有尖叶杜英、香樟、假苹婆和山杜英,0.5~1.0 m²之间的有铁冬青和木荷。到12个月时,冠幅面积超过3 m²有山杜英和尖叶杜英,其中山杜英的冠幅面积最大,为3.72 m²;冠幅面积在2~3 m²范围内的包括香樟和假苹婆;木荷的冠幅面积最小,约为1.49 m²,包括铁冬青和木荷。18个月时,木荷、铁冬青冠幅面积较小,分别为1.99、2.79 m²;假苹婆和香樟冠幅中等,分别为4.58、4.08 m²;而尖叶杜英的冠幅面积最大,达到5.95 m²。

叶面积指数变化如图3所示,6~12个月内,各树种的叶面积指数增长趋势和增长速率较为一致,12~18个月期间,假苹婆和铁冬青的叶面积指数增长速度开始减缓,其他树种仍保持与6~12个月期间相近的增长速率。

3.2 细根生物量变化

细根生物量变化由表2可知,改造后6~12个月内,6个树种的细根生物量均呈现快速增长趋势,其中山杜英和尖叶杜英的细根生长量最大,且明显高于其他4个树种。改造后18个月时,除假苹婆的细根生物量有所提高外,其他5个树种的细根生物量未出现明显变化,其中香樟、山杜英和尖叶杜英的细根生物量有略微降低,但其变化不显著。

3.3 土壤理化性质变化

由表3可知,改造后18个月时改造地块内的土壤物理性质中,总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙率有所提高,但其变化不显著;土壤化学性质中有效氮、速效钾和土壤有机质含量显著提高,其他指标虽有所提高,但与改造前相比无显著差异。

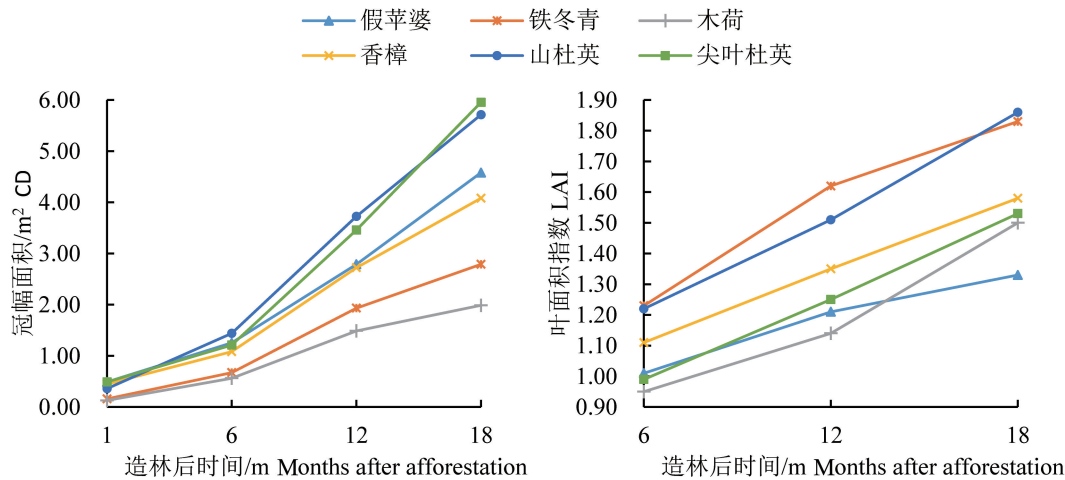


图3 6个树种的冠幅、叶面积指数变化
Figure 3 Change of tree crown area and LAI of six tree species

表2 6个树种细根生物量变化
Tab.2 Change of fine root biomass of six tree species

树种 Tree species	改造时间 Renovation time		
	6个月 6 months	12个月 12 months	18个月 18 months
	g · m ⁻²		
假苹婆	20.34±15.23b	232.57±108.44a	276.34±153.20a
铁冬青	22.19±18.55b	290.64±122.98a	297.98±114.41a
木荷	13.27±10.31b	246.49±116.37a	267.5±124.11a
香樟	17.33±18.27b	286.45±105.40a	286.39±135.28a
山杜英	22.72±23.42b	402.63±175.29a	401.63±127.22a
尖叶杜英	30.96±20.16b	436.71±171.61a	419.72±215.46a

注：表中为平均值±标准差，针对每一个树种，不同的字母表示其细根生物量不同时间测量结果之间存在显著性差异（P<0.05）。
Note: AVG±SD, for each tree species, the different capital letters indicate significant differences (P<0.05) between biomass at different months.

表 3 低效林改造地块土壤理化性质

Table 3 Soil physical and chemical properties of low efficiency forest transformation plot

土壤理化性质指标 Soil physical and chemical characteristics	改造前 Before transformation	改造后 18 个月 18 months after renovation
土壤含水量/%	22.35±1.80	20.10±2.62
土壤总孔隙度/%	38.92±2.66	45.72±7.09
土壤毛管孔隙度/%	35.66±2.86	39.31±4.77
非毛管孔隙率/%	4.37±1.56	6.41±1.34
单位容积质量/(g·cm ⁻³)	1.28±0.07	1.31±0.08
全氮/(g·kg ⁻¹)	1.01±0.22	1.03±0.24
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.26±0.09	0.31±0.15
全钾/(g·kg ⁻¹)	15.40±4.78	21.52±6.89
有效氮/(mg·kg ⁻¹)	52.69±17.43 [*]	134.86±21.05 [*]
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	1.12±0.19	1.15±0.17
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	20.33±8.64 [*]	83.65±20.35 [*]
pH 值	4.18±0.25	5.11±0.56
土壤有机质/(g·kg ⁻¹)	11.45±2.83 [*]	18.71±3.92 [*]

注：符号“*”表示改造前与改造后 18 个月时的测定结果之间的差异显著 ($P<0.05$)。
Note: “*” indicates a significant difference between the measured results before and 18 months after modification ($P<0.05$).

4 结论与讨论

4.1 现有研究表明：植物细根与叶片作为植物地上与地下部分重要的养分吸收器官，是植物吸收和释放物质的主要通道，其在植物生长发育的过程中具有重要作用^[22-24]。通过对 6 个树种的细根生物量的测定分析可以看出，本次低效林改造所选用的树种在造林初期细根生长较快，在改造后 12~18 个月时，各树种细根生长均已趋于稳定。结合各树种的树高、地径和冠幅等生长指标，可以看出在改造后 6 个月后，植物的生物量分配逐渐由根系生长向树冠生长过渡。这可能是由于在植株生长前期，植物有优先将生物量分配给可以获取更多限制性资源的器官以促进生长^[25-28]，在造林初期，植物需要通过快速的根系生长以获得更多的水分以及地域强风的能力，能够存活下来，而一旦根系生长满足上述条件后，植物更倾向于树冠的生长，以加强光合作用，获取更多的能量，满足后续的生长。

对改造前后土壤理化性质的分析结果表明，改造地块内的部分土壤理化性质发生了显著变化：土壤物理性质中，总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙率有所提高，这说明通过实施低效林的改造，在一定程度上改善了土壤孔隙结构，提高了土壤物理结构的稳定性，这可能是由于植物根系的生长和土壤有机质的增加提高了土壤团聚体的

稳定性^[29-30]，对土壤结构起到稳定作用；土壤化学性质的变化较为明显，土壤中的有效氮、速效钾和土壤有机质含量有显著提高，这说明低效林改造后植物根系的生长发育对提高土壤肥力起到较为明显的作用；多位学者^[28,31-35]在其相关研究中发现不同的植被类型，不同的地形条件下，植物根系都能够不同程度地增加土壤有机质含量。

4.2 罗湖区低效林改造项目共完成造林 82.11 hm²，从树高、地径、冠幅和叶面积指数等多个生长指标可以看出，0~18 个月内，山杜英一直保持较高的树高增长速度；山杜英、假苹婆和尖叶杜英的地径生长具有明显优势；尖叶杜英的冠幅面积在 6 个树种中表现最优；假苹婆和铁冬青的树冠叶面积指数增长速度逐渐降低；假苹婆的细根生物量持续升高。

进一步分析得到：尖叶杜英、山杜英和假苹婆这 3 个树种，在 6 个月后，树冠绿量快速增加，增强光合作用，以获取更多的能量。同时，树冠保持较为通透的形式，可以较好地适应深圳等滨海城市台风高发环境。本项目以桉树林、马占相思林等树种为主的低效林改造模式可进一步用于城郊森林建设，并可为其它相似地区城市提供参考。下一步研究可以对不同改造模式对城郊森林生态效益的影响进行分析，并对如何建立评价体系 and 指标筛选进行研究。

参考文献

- [1] 刘飞鹏, 战国强. 城市化背景下城郊森林保护利用的实践与探讨: 以深圳市龙岗区为例[J]. 广东林业科技, 2007, 23(4): 102-106.
- [2] 阎传海, 徐科峰. 城市森林研究进展[J]. 青岛建筑工程学院学报, 2004, 25(4): 49-52.
- [3] 张云, 彭旭路, 樊国盛. 以昆明市呼马山公园为例探讨城郊森林公园的规划建设模式[J]. 农业科技与信息(现代园林), 2012(Z3): 21-26.
- [4] 王韶晗, 宋爽, 石梦溪, 等. 城郊森林公园康养景观质量评价体系的构建: 以黑龙江加格达奇国家森林公园为例[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(12): 60-65.
- [5] 张琳. 河南省级城郊森林公园规划问题探讨[J]. 河南林业科技, 2020, 40(3): 51-52.
- [6] 尹华波, 陈明皋, 吴际友, 等. 长沙城郊森林景观提质与植物应用技术[J]. 湖南林业科技, 2018, 45(5): 111-116.
- [7] [作者不详]. 关于深圳市森林城市建设的调研报告[J]. 河北林业, 2018(5): 17-19.
- [8] 万祝娇. 城郊公园林分景观提质增效探讨: 广州市黄埔区森林公园低效林分改造[J]. 花卉, 2017(16): 135-136.
- [9] 吴捷. 深圳市打造“世界著名花城”三年行动计划[J]. 现代园艺, 2017(15): 140-141.
- [10] [作者不详]. 中共深圳市委关于制定深圳市国民经济和社会发展的第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议(节选)[J]. 住宅与房地产, 2021(11): 16-20.
- [11] 谢立新, 陈家裕, 岑祖才. 深圳市光明区 2018—2020 年低效林改造城市生态风景林探讨[J]. 林业勘查设计, 2022, 51(4): 24-28.
- [12] 张亮, 黄华蓉. 罗湖区林业发展分析[J]. 广东科技, 2006(3): 207-208.
- [13] 刘伟玲, 张林波, 叶有华. 深圳市森林植被碳储量特征及其空间分布[J]. 生态科学, 2012, 31(2): 144-154.
- [14] 李洪忠, 陈劲松, 韩宇, 等. 微观尺度城市热环境影响因素分析研究: 以深圳市罗湖区为例[J]. 生态环境学报, 2019, 28(8): 1622-1631.
- [15] 李雪飞, 杨艳刚. 城市生态功能区划及其在生态安全格局中的应用研究: 以深圳市为例[J]. 长春大学学报, 2013, 23(6): 701-704.
- [16] 王定跃, 刘永金, 郝忠良. 景观生态林的理论与实践: 以深圳梧桐山泰山涧南亚热带景观生态实验林为例[J]. 风景园林, 2008(1): 60-63.
- [17] 陈蝶. 连山县生态景观林带建设树种选择与配置[J]. 绿色科技, 2021, 23(1): 58-59.
- [18] 张开文, 从睿, 王定跃. 梧桐山风景区杜鹃花引种栽培初报[J]. 江苏林业科技, 2017, 44(4): 49-52.
- [19] 林钟洪. 浅谈山区造林地清理与整地及植树造林技术[J]. 吉林农业, 2012(12): 170-171.
- [20] ZHANG C, STRATOPOULOS LMF, PRETZSCH H, et al. How do *tilia cordata* greenspire trees cope with drought stress regarding their biomass allocation and ecosystem services[J]. Forests, 2019, 10(8): 676.
- [21] LI Y Y, SHAO M A. Change of soil physical properties under longterm natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 64: 77-96.
- [22] 罗永清, 赵学勇, 王涛, 等. 植物根系分解及其对生物和非生物因素的响应机理研究进展[J]. 草业学报, 2017, 26(2): 197-207.
- [23] 李鹏, 赵忠, 李占斌, 等. 植被根系与生态环境相互作用机制研究进展[J]. 西北林学院学报, 2002(2): 26-32.
- [24] 高小敏, 刘世荣, 王一, 等. 穿透雨减少和氮添加对毛竹叶片和细根化学计量的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1440-1450.
- [25] LIU R, YANG X J, GAO R R, et al. Allometry rather than abiotic drivers explains biomass allocation among leaves, stems and roots of *Artemisia* across a large environmental gradient in China[J]. Journal of Ecology, 2021, 109: 1026-1040.
- [26] POORTER H, NIKLAS K J, REICH P B, et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control[J]. New Phytologist, 2012, 193: 30-50.
- [27] SAHOO G R, SWAMY S L, MISHRA A, et al. Effect of seed source, light, and nitrogen levels on biomass and nutrient allocation pattern in seedlings of *Pongamia pinnata*[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28: 15005-15020.
- [28] 吕渡, 杨亚辉, 赵文慧, 等. 不同恢复类型植被细根分布及与土壤理化性质的耦合关系[J]. 生态学报, 2018, 38(11): 3979-3987.
- [29] 常云妮, 李宝银, 钟全林, 等. 三种功能型林木幼苗生物量分配及其与细根和叶片养分关系[J]. 生态学杂志, 2022, 41(11): 2090-2097.
- [30] 赵富王, 王宁, 苏雪萌, 等. 黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 105-113.
- [31] 张彦军, 郭胜利. 复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 961-969.
- [32] 韩凤朋, 郑纪勇, 张兴昌. 黄土退耕坡地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 50-55.
- [33] KITTERER T, BOLINDER M A, ANDRÉN O, et al. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 141(1/2): 184-192.
- [34] 沈德才, 周永东, 龙田养, 等. 东莞市森林土壤有机质空间变异性研究[J]. 广东林业科技, 2013, 29(5): 1-5.
- [35] 戴智明, 梁少湖, 陆双莉, 等. 粤东沿海不同林种森林土壤养分差异研究[J]. 林业与环境科学, 2023, 39(5): 15-19.