

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第6期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.06.005

论文标题： 湖南省5个油茶主栽品种幼苗对紫色土的适应性

作　　者： 罗晶晶，李建安，尹思洁，等

收稿日期： 2025-05-12

引文格式： 罗晶晶,李建安,尹思洁,等.湖南省5个主栽油茶品种幼苗对紫色土的适应性研究[J].中南林业科技大学学报,2026,46(6):44-55.

LUO J J, LI J A, YIN S J, et al. Adaptability of seedlings from five predominant *Camellia oleifera* cultivars to purple soils in Hunan Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):44-55.

相关论文推荐

Recommended articles

我国油茶科技进展与未来核心技术

Scientific and technological progress and future core technologies of oil tea *Camellia* in China

干旱-复水处理对3个油茶良种的生长与光合生理特性的影响

Effects of drought and rehydration treatment on the growth, photosynthesis and physiological characteristics of three *Camellia oleifera* cultivars

药用植物浸提液对油茶种子萌发及幼苗生长的影响

Effects of medicinal plant extract on seed germination and seedling growth of *Camellia oleifera*

油茶种间杂交F_1代优株花果性状的比较

Comparative analysis of flower and fruit traits in F_1 generation of interspecific hybridization of *Camellia oleifera*

江西10个主栽油茶品种的开花及授粉生物学特性

Flowering and pollination biology of 10 main *Camellia oleifera* cultivars in Jiangxi Province

干旱下施肥对油茶叶片关键代谢途径的影响

Transcriptome analysis of the effects of fertilization under drought on key metabolic pathways in *Camellia oleifera* leaves

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.06.005
http: //qks.csuft.edu.cn

湖南省 5 个油茶主栽品种幼苗对紫色土的适应性

罗晶晶[1a, 2]，李建安[1, 2]，尹思洁[1a, 2]，解子安[1a, 2]，郭璞瑞[1a, 2]，陈嫣灵[1a, 2]，阎晋东[1, 2]

（1. 中南林业科技大学 a. 林学院；b. 木本油料资源利用全国重点实验室；c. 经济林培育与保护教育部重点实验室，湖南 长沙 410004；2. 岳麓山实验室经济林品种创制中心，湖南 长沙 410004）

摘　要：【目的】探究湖南省 5 个油茶主栽品种幼苗在酸性紫色土、碱性紫色土及红壤（对照）中的生长与生理特性差异，以期为湖南省紫色土区的油茶适生性评价、品种筛选及土壤定向改良提供理论依据。【方法】采用盆栽试验，以红壤为对照，测定‘华硕’‘华金’‘华鑫’‘湘林 210’‘衡东大桃 2 号’3 年生幼苗在 3 种土壤中的生长及生理生化指标，并采用隶属函数法和主成分分析法进行综合评价。【结果】酸性紫色土更适宜油茶生长，各品种生长指标隶属函数均值均高于红壤和碱性紫色土。酸性土中，‘华硕’和‘衡东大桃 2 号’综合表现最优，生长及生理生化指标总体良好，但叶绿素含量较低。碱性土中，‘华硕’与‘华鑫’抗氧化酶活性较高，但前者丙二醛含量最高，细胞膜受损严重，适应性差；‘华鑫’丙二醛含量较低，隶属函数排名靠前，表现出更强的膜稳定性与抗逆性。主成分分析结果表明，所有品种在酸性土中排名均优于其余土壤，‘衡东大桃 2 号’与‘华鑫’在红壤和酸性紫色土中表现良好，‘华金’与‘华鑫’在碱性土中适应性相对较好。【结论】综合各处理指标数据，酸性紫色土最适宜油茶生长，其栽培品种在综合排名前 5 位中占比达 100%。土壤适应性排序为酸性紫色土＞红壤＞碱性紫色土。酸性紫色土和红壤中‘衡东大桃 2 号’和‘华鑫’均表现最佳；碱性紫色土中‘华金’和‘华鑫’相对表现优异。综合各油茶品种在 3 种土壤类型上的表现，‘华鑫’整体上适应性最好。

关键词：油茶；紫色土；适应性；生长指标；生理指标

中图分类号：S714.6；S794.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)06-0044-12

Adaptability of seedlings from five predominant *Camellia oleifera* cultivars to purple soils in Hunan Province

LUO Jingjing[1a,2], LI Jian'an[1, 2], YIN Sijie[1a,2], XIE Zi'an[1a,2], GUO Purui[1a,2], CHEN Yanling[1a,2], YAN Jindong[1,2]

(1.a. School of Forestry; b. State Key Laboratory of Utilization of Woody Oil Resource; c. Key Laboratory of Cultivation and Conservation of Non-timber Forest, Ministry of Education, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2. Economic Forest Variety Innovation Center, Yuelushan Laboratory, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract:【Objective】This study aimed to investigate the differences in growth and physiological characteristics of seedlings from five predominant *Camellia oleifera* cultivars in Hunan Province under acidic purple soil, alkaline purple soil, and red soil (control) conditions, so as to provide a theoretical basis for ecological adaptability evaluation, cultivar selection, and targeted soil improvement of *C. oleifera* in purple soil regions of Hunan.【Method】A pot experiment was conducted using red soil as the control. Growth, physiological, and biochemical indices of three-year-old seedlings of five cultivars ('Huashuo', 'Huajin', 'Huaxin', 'Xianglin 210', and 'Hengdong Datao No.2') were measured across three soil types. The data were comprehensively evaluated using membership function method and principal component analysis.【Result】The acidic purple soil was more favorable for the growth of *C. oleifera*, with the average membership function values of growth indicators for all cultivars being higher than those in the red soil and alkaline purple soil. Under acidic soil conditions, 'Huashuo' and 'Hengdong Datao No.2' showed the most comprehensive performance, with generally desirable growth, physiological, and biochemical parameters, although their chlorophyll content was comparatively lower.

收稿日期（Received）：2025-05-12　　**修订日期**（Revised）：2025-09-07

基金项目：国家自然科学基金项目（32371930）；湖南省自然科学基金青年项目（2023JJ41041）；岳麓山实验室种业专项（YLS-2025-ZY04068）。

第一作者：罗晶晶（3312613973@qq.com），硕士研究生。

通信作者：李建安（lja0731@126.com），教授，博士，博士研究生导师；阎晋东（yjd0731@outlook.com），讲师，博士，硕士研究生导师。

引文格式：罗晶晶 , 李建安 , 尹思洁 , 等 . 湖南省 5 个主栽油茶品种幼苗对紫色土的适应性 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(6):44-55.

LUO J J, LI J A, YIN S J, et al. Adaptability of seedlings from five predominant *Camellia oleifera* cultivars to purple soils in Hunan Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):44-55.

In alkaline soil, both ‘Huashuo’ and ‘Huaxin’ exhibited elevated antioxidant enzyme activities; however, ‘Huashuo’ displayed the highest malondialdehyde (MDA) content, indicating substantial membrane damage and poor adaptability. In contrast, ‘Huaxin’ maintained lower MDA levels and achieved higher membership function rankings, reflecting superior membrane stability and stress tolerance. Principal component analysis revealed that all cultivars performed better in acidic soil than in the other soil types. ‘Hengdong Datao No. 2’ and ‘Huaxin’ performed well in both red soil and acidic purple soil, whereas ‘Huajin’ and ‘Huaxin’ demonstrated relatively better adaptability in alkaline purple soil.【Conclusion】Comprehensive analysis of all measured indicators revealed that acidic purple soil was the most suitable for *C. oleifera* growth, with cultivars grown in this soil type occupying the top five positions in the overall ranking. The order of soil adaptability was determined as: acidic purple soil ＞ red soil ＞ alkaline purple soil. ‘Hengdong Datao No. 2’ and ‘Huaxin’ exhibited the best performance in both acidic purple soil and red soil, while ‘Huajin’ and ‘Huaxin’ showed relatively superior adaptation in alkaline purple soil. Considering the overall performance across all three soil types, ‘Huaxin’ demonstrated the strongest comprehensive adaptability.

Keywords: *Camellia oleifera*; purple soil; adaptability; growth indicator; physiological indicator

油茶 *Camellia oleifera* Abel. 原产于中国，是山茶科 Theaceae 常绿乔木，与油棕 *Elaeis guineensis*、油橄榄 *Olea europaea* 和椰子 *Cocos nucifera* 并称为世界四大木本油料树种 [1]。油茶广泛栽培于中国南方低山丘陵地，具有极强的适应性，能够抵抗贫瘠和干旱，生长环境广泛，兼具经济与生态价值 [2-4]。近年来，我国食用植物油自给率持续下降，保障油料安全已成为国家战略需求 [5]。油茶作为我国特有的重要木本油料作物，对提升食用油供给具有关键作用 [6]。

湖南省作为油茶主产区，其广泛分布的紫色土对油茶生长具有重要影响。紫色土在湖南达 151.95 万 hm^2，集中分布于衡阳盆地及沅水流域，矿质养分丰富、适耕性强，但抗蚀性弱、旱敏性高，在此类区域种植油茶，兼具防控水土流失与生产高质茶油（富含不饱和脂肪酸及微量元素）的双重效益 [7-11]。土壤酸碱性显著影响植物适应 [12-13]，紫色土按酸碱度与碳酸钙含量分为酸性、中性及碱性（石灰性）三类 [14]。魏静等 [15] 研究不同品种美国红枫 *Acer rubrum* 在不同紫色土环境中的适应性发现‘马莫’*Acer* × *freemanii* ‘Marmo’较适应中性紫色土，对碱性紫色土适应性较弱；‘金叶槭’*Acer rubrum* ‘Aurea’对 2 种紫色土均表现出良好的适应性。张文等 [16] 研究发现不同品种玫瑰对不同土壤的适应性存在显著差异，紫枝玫瑰 *Rosa rugosa* ‘Zizhi’最适种植的土壤类型为酸性黄壤，另外 2 种玫瑰最适种植土壤类型为弱碱性紫色土。

紫色土产区具备产出优质茶油的潜力，但不同紫色土在酸碱度、养分含量和持水性等方面差别较大，在一定程度上限制了油茶的推广。当前研究多聚焦于紫色土改良技术，而针对不同酸碱度紫色土亚类与不同油茶品种适配性的系统性研究存在空缺。本研究旨在探究 5 个油茶主栽品种对酸性和碱性紫色土的适应性差异，筛选适宜不同紫色土类型的油茶品种，为油茶品种选育、紫色土定向改良及区域化推广提供科学依据，对于推动紫色土资源的高效利用及保障国家木本粮油安全具有重要战略价值。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

本试验于 2023 年在湖南省长沙市中南林业科技大学（28°08′15″N，113°00′04″E）进行，地属亚热带季风气候，具有高热和多雨的特点。年平均气温 18.7 ℃，年降水量为 1 181.6 mm，试验期间最高平均温度月份为 7 月份（26 ～ 35 ℃）、最高日气温为 7 月 12 日（40 ℃）。

1.2　试验材料

试验前进行初步调研，采用盆栽试验方式，选用衡阳市的湖南大三湘茶油股份有限公司培育的 3 年生的 5 个湖南省油茶主栽品种嫁接容器苗（包括‘华硕’‘华金’‘华鑫’‘湘林 210’和‘衡东大桃 2 号’）。选取的苗木均健康无病虫害且长势一致。

供试土壤选取湖南醴陵市船湾镇地区的酸性紫色土和衡阳市谭子山镇地区的碱性紫色土，以适合油茶生长的普通红壤作为对照，红壤采集于长沙市天心区。其基本信息如表 1 所示。

1.3　试验设计

于 2022 年 9 月下旬将 5 个油茶品种用红壤、酸性紫色土、碱性紫色土栽种于 30 cm（上口径）×20 cm（下口径）×30 cm（高）的育苗塑料盆中，每盆植入 1 株油茶苗，共 15 个处理，每个处理重复 9 次，共 135 株。进行编号后随机摆放在遮阴棚内，每隔一周随机调换。

表 1 土壤基本化学性质 †
Table 1 Basic chemical properties of soil

土壤类型 Soil type	红壤 Red soil	酸性紫色土 Acidic purple soil	碱性紫色土 Alkaline purple soil
来源 Origin	长沙市天心区	醴陵市船湾镇大坡里村	衡阳市衡南县谭子山镇工联村
地理坐标 Coordinate	28°08′24″ N，112°59′24″E	27°27′36″N，113°28′48″E	26°52′12″ N，112°22′48″E
pH 值 pH value	5.76±0.06 b	4.44±0.01 c	8.38±0.25 a
全氮 TN /(g·kg^{-1})	0.73±0.01 a	0.42±0.01 c	0.57±0.01 b
全磷 TP /(g·kg^{-1})	0.43±0.01 b	0.17±0.01 c	0.73±0.01 a
全钾 TK /(g·kg^{-1})	12.43±0.04 c	19.44±0.04 b	26.13±0.29 a
水解性氮 HN /(mg·kg^{-1})	72.83±0.14 a	34.70±0.14 b	30.52±0.44 c
有效磷 AP /(mg·kg^{-1})	1.22±0.01 c	1.33±0.01 b	1.75±0.04 a
速效钾 AK /(mg·kg^{-1})	128.99±1.53 a	66.67±1.53 c	103.08±0.63 b
有机质 SOM /(g·kg^{-1})	12.67±0.12 a	4.80±0.12 c	11.37±0.46 b

† 表中数据以平均值 ± 标准差的形式呈现；同一行中不同小写字母表示在相应土壤化学性质指标下，不同土壤类型之间具有显著性差异（$P < 0.05$）。Data are presented as mean±standard error. Different lowercase letters in the same row indicate significant differences among soil types for each soil chemical property ($P < 0.05$).

1.4 指标测定

1.4.1 油茶生长指标测定

于 2023 年 4—9 月的每月 25—27 日测定苗木生长指标。分别采用卷尺（精度 0.1 cm）测量油茶苗高、数显游标卡尺（精度 0.01 mm）测量地径。各处理苗高和地径总增长量按 9 月测量值减去 4 月测量值计算。2023 年 10 月中旬，从各处理组随机选取 3 株苗木，挖出洗净、擦干表面水分后称整株鲜质量。采用根系扫描仪（Epson Expression 11000 XL）扫描根系，并利用 Win-Rhizo 2013 分析系统获取总根长和根体积。将植株根、茎、叶部分置于 105 ℃烘箱中杀青 30 min，再于 75 ℃下烘至恒质量，用电子天平（精度 0.01 g）称干质量，计算总生物量。

1.4.2 油茶叶片生理生化指标测定

于 2023 年 9 月下旬采集 3 种土壤条件下 5 个油茶主栽品种的健康成熟叶片用于生理生化指标分析，采样时于东、西、南、北 4 个方向选取长势良好、无病虫害植株，取中上部叶片装入冻存管，液氮速冻后统一保存于 -80 ℃超低温冰箱中备用；使用 UV-1900 紫外可见分光光度计测定吸光度，每处理设 3 次生物学重复。所测指标及方法为：可溶性蛋白（SP）含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定；可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定 [17]；游离脯氨酸含量采用酸性茚三酮法测定 [18]；丙二醛（MDA）含量采用硫代巴比妥酸法（TAB）测定 [19]；总叶绿素含量采用丙酮 - 乙醇混合液法测定 [20]。

1.4.3 抗氧化酶活性测定

过氧化氢酶（CAT）、过氧化物酶（POD）和超氧化物歧化酶（SOD）活性均使用相应试剂盒进行测定。每个处理重复 3 次。

1.5 数据处理

使用 Excel 2019 软件对试验数据进行整理；采用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析（ANOVA）、Duncan 多重比较检验（$P < 0.05$）及主成分分析，并对各项指标进行 Pearson 相关性分析，探究各指标之间的关联程度；使用 Origin 2024 软件绘制图表；使用隶属函数法评价分别计算各指标的隶属函数值，各指标隶属函数计算公式为：

正相关指标：

$$U(x_i) = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (1)$$

负相关指标：

$$U(x_i) = 1 - (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (2)$$

式中：x_i 为指标测定值，$x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为各处理的最大值和最小值，正相关指标使用公式（1）计算其隶属函数值，负相关指标（如 MDA）则使用公式（2）计算其隶属函数值。

2 结果与分析

2.1 不同土壤类型对油茶生长指标的影响

2.1.1 不同土壤类型对油茶苗高、地径增长量的影响

如表 2 所示，在苗高增长量方面，同一土壤条件下各油茶品种间的差异不显著（$P > 0.05$），不同土壤类型间存在显著差异（$P < 0.05$）。其中，‘湘林 210’的苗高增长量在不同土壤条件下差异显著（$P < 0.05$），表现为酸性紫色土＞红壤＞碱性紫色土，其余处理之间苗高增长量差异不显著（$P > 0.05$）。

表 2　不同土壤类型对 5 个油茶主栽品种生长相关指标的影响 †

Table 2　Effects of different soil types on growth-related parameters of five main cultivars of *C. oleifera*

土壤类型 Soil type	品种 Variety	苗高增长量 Seedling height growth /cm	地径增长量 Ground diameter increment /mm	根系长度 Total root length /cm	根体积 Root volume /cm^3	总生物量 Total biomass /g
红壤 Red soil	华硕	3.03±0.12 aA	2.11±0.47 abAB	871.09±11.42 abB	16.41±2.33 abB	68.27±1.00 bB
	华金	3.23±1.07 aA	1.80±0.18 bB	684.70±48.25 bcB	14.82±3.15 bB	70.59±0.80 bB
	华鑫	3.98±0.39 aA	2.45±0.38 aA	660.58±53.46 cB	12.92±0.54 bB	75.77±2.73 aB
	湘林 210	3.62±0.37 aA	2.11±0.06 abA	949.53±123.17 aB	16.49±1.50 abA	61.63±3.27 cB
	衡东大桃 2 号	3.33±0.36 aA	2.03±0.34 abAB	987.57±182.10 aB	19.13±1.86 aB	74.53±0.77 aB
酸性紫色土 Acidic purple soil	华硕	4.54±1.42 aA	2.44±0.68 aA	1 829.68±353.54 aA	34.75±2.75 aA	103.79±6.40 aA
	华金	4.05±0.72 aA	2.37±0.26 aA	1 927.81±341.33 aA	24.52±0.70 bA	92.90±1.66 bA
	华鑫	4.23±0.64 aA	2.74±0.37 aA	1 930.78±373.47 aA	24.30±2.33 bA	104.40±3.44 aA
	湘林 210	4.08±0.37 aA	2.42±0.37 aA	1 204.50±22.89 bA	15.87±1.01 cA	74.09±2.20 dA
	衡东大桃 2 号	4.08±2.25 aA	2.76±0.71 aA	2 086.37±158.36 aA	31.96±4.14 aA	82.52±1.97 cA
碱性紫色土 Alkaline purple soil	华硕	2.75±1.06 aA	1.47±0.38 aB	866.84±31.23 bB	13.65±1.33 abB	51.44±0.88 cC
	华金	3.87±2.22 aA	1.15±0.12 abC	945.01±29.34 aB	15.44±1.15 aB	65.79±0.96 aC
	华鑫	3.30±0.79 aA	0.74±0.12 bB	853.62±21.34 bB	13.25±2.21 abB	59.35±0.94 bC
	湘林 210	2.67±0.83 aB	1.32±0.22 aB	372.71±15.62 dC	10.75±0.11 cB	39.40±1.25 eC
	衡东大桃 2 号	2.78±0.46 aA	1.50±0.39 aB	774.69±42.93 cB	12.21±0.62 bcC	48.63±0.40 dC

† 小写字母表示同一种土壤下，5 个油茶主栽品种间的差异显著（$P < 0.05$）。大写字母表示同一品种在 3 种土壤间差异显著（$P < 0.05$），下同。Lowercase letters indicate significant differences among five *C oleifera* varieties under the same soil ($P < 0.05$). Capital letters indicate significant differences among different soils of the same variety ($P < 0.05$), the same below.

在地径增长量方面，品种与土壤类型存在显著交互作用（$P < 0.05$），具体表现为：在红壤条件下，‘华鑫’的地径增长量显著高于‘华金’；在酸性紫色土中，各品种间地径增长量无显著差异（$P > 0.05$）；在碱性紫色土中，‘衡东大桃 2 号’的地径增长量显著高于‘华鑫’（$P < 0.05$）。酸性紫色土中的地径增长量普遍高于碱性紫色土，增幅为 65.9% ～ 270.3%，且所有品种的地径增长量均呈现出酸性紫色土＞红壤＞碱性紫色土的显著梯度变化趋势（$P < 0.05$）。

2.1.2　不同土壤类型对油茶根系构型的影响

如图 1 所示，红壤条件下，各油茶品种主根发达，侧根较密集。酸性紫色土条件下，各油茶品种主根发达，侧根及须根较为密集。碱性紫色土条件下侧根生长受抑制，主根突出，侧根稀疏。多元方差分析结果显示（表 2），在不同土壤条件下，油茶品种的根系特征表现出显著差异。在红壤条件下，‘衡东大桃 2 号’的总根系长度和根体积

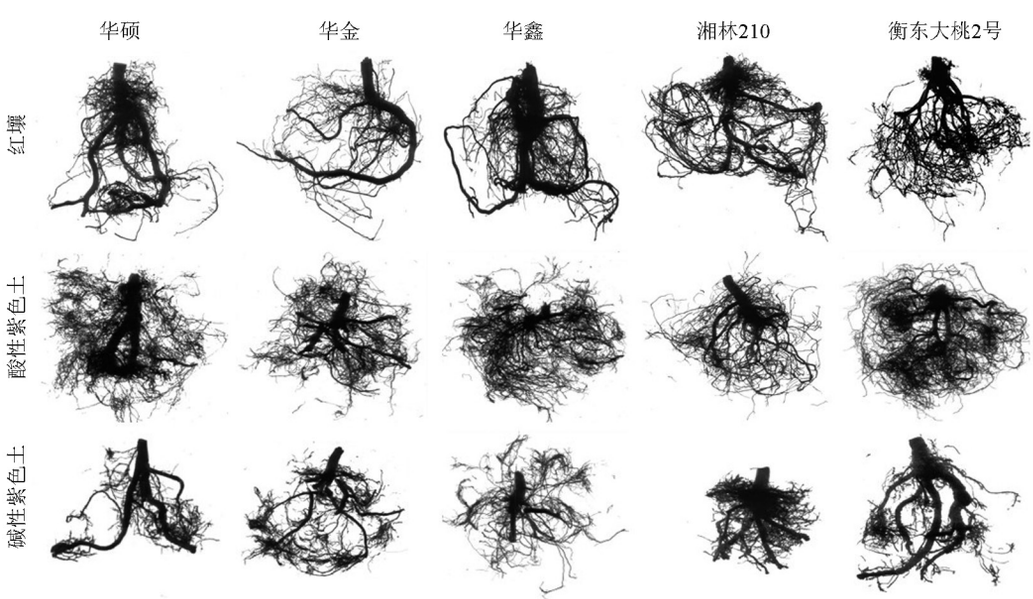


图 1　不同土壤类型下 5 个油茶主栽品种幼苗的根系形态

Fig. 1　Root morphology of seedlings of five main cultivars of *C. oleifera* under different soil types

均显著高于‘华鑫’（$P < 0.05$）。在酸性紫色土中，‘衡东大桃 2 号’根系表现最佳，其根体积显著大于除‘华硕’外的其余 3 个品种（$P < 0.05$）。碱性紫色土条件下，‘华金’的总根系长度显著高于其他品种，其根体积显著高于‘衡东大桃 2 号’和‘湘林 210’（$P < 0.05$）。

2.1.3 不同土壤类型对油茶生物量的影响

如表 2 所示，对不同土壤条件下 5 个油茶品种进行双因素方差分析，结果表明总生物量同时受品种和土壤环境的显著影响（$P < 0.05$），且二者存在交互效应。同一品种的生物量表现为酸性紫色土＞红壤＞碱性紫色土。酸性紫色土条件下，‘华硕’和‘华鑫’的总生物量显著高于其余油茶品种（$P < 0.05$）。碱性紫色土条件下，‘华金’和‘华鑫’的总生物量显著大于其余 3 个品种（$P < 0.05$）。各处理中，总生物量最高为酸性紫色土的‘华鑫’，显著高于最低的碱性紫色土‘湘林 210’（$P < 0.05$）。

2.2 不同土壤类型对油茶生理生化指标的影响

2.2.1 不同土壤类型对油茶渗透调节物质与膜脂过氧化指标的影响

由表 3 可知，不同土壤条件显著影响油茶幼苗的渗透调节物质与膜脂过氧化水平。可溶性蛋白含

表 3 不同土壤类型对 5 个油茶主栽品种生理生化指标的影响

Table 3 Effects of different soil types on physiological and biochemical parameters of five main cultivars of *C. oleifera*

土壤类型 Soil type	品种 Variety	可溶性蛋白 Soluble protein /(mg·g^{-1})	可溶性糖 Soluble sugar /(mg·g^{-1})	游离脯氨酸 Free proline /(μg·g^{-1})	丙二醛 MDA /(μmol·g^{-1})
红壤 Red soil	华硕	60.26±0.49 cdB	3.30±0.36 bB	5.29±0.03 aA	5.92±0.33 aB
	华金	58.54±0.26 dC	2.52±0.06 cB	4.31±0.20 bcA	5.97±0.37 aA
	华鑫	65.07±0.24 bB	4.69±0.45 aA	3.64±0.51 cA	4.64±0.16 bB
	湘林 210	62.30±0.54 cA	4.35±0.34 aA	4.66±0.20 bA	5.59±0.44 aAB
	衡东大桃 2 号	68.26±2.66 aA	4.30±0.20 aA	4.64±0.22 bA	5.10±0.46 abB
酸性紫色土 Acidic purple soil	华硕	63.73±0.12 cA	4.17±0.10 aA	4.67±0.06 aB	4.53±0.22 cC
	华金	66.10±0.10 aA	3.93±0.24 bA	4.28±0.35 bA	4.43±0.33 cB
	华鑫	65.72±0.63 aB	3.29±0.12 aB	4.02±0.05 bcA	4.33±0.16 cB
	湘林 210	64.57±0.09 bA	4.26±0.66 aA	3.81±0.09 cB	5.11±0.11 bB
	衡东大桃 2 号	64.95±0.14 bA	3.90±0.02 aB	4.69±0.05 aA	5.61±0.23 aB
碱性紫色土 Alkaline purple soil	华硕	59.34±0.29 bC	3.73±0.15 aAB	5.26±0.27 aA	6.77±0.18 aA
	华金	61.17±0.01 bB	2.52±0.12 bB	3.42±0.05 cB	6.48±0.27 abA
	华鑫	67.99±0.69 aA	3.67±0.26 aB	4.09±0.28 bA	6.52±0.20 abA
	湘林 210	59.25±1.62 bB	3.40±0.04 aA	3.76±0.19 bcB	6.20±0.13 bA
	衡东大桃 2 号	66.72±0.46 aA	3.50±0.15 aC	4.20±0.14 bB	6.75±0.29 aA
土壤类型 Soil type	品种 Variety	总叶绿素 Total chlorophyll /(mg·g^{-1})	过氧化氢酶活性 CAT activity /(U·g^{-1})	过氧化物酶活性 POD activity /(U·g^{-1})	超氧化物歧化酶活性 SOD activity /(U·g^{-1})
红壤 Red soil	华硕	3.78±0.06 aA	70.42±1.32 dC	231.45±2.20 cB	28.32±0.92 dB
	华金	3.05±0.10 bA	67.23±1.77 dB	259.32±1.75 bA	37.03±0.24 bB
	华鑫	2.61±0.14 dA	74.09±1.49 cB	212.56±2.20 dC	35.44±0.66 cC
	湘林 210	2.59±0.04 dA	82.63±0.87 bB	261.45±0.66 bA	38.99±0.92 aA
	衡东大桃 2 号	2.82±0.02 cA	106.56±2.79 aA	309.04±0.89 aA	37.02±0.05 bB
酸性紫色土 Acidic purple soil	华硕	2.51±0.07 aB	80.34±1.41 bB	212.35±3.73 dC	42.44±0.30 aA
	华金	2.21±0.01 bB	76.01±0.36 cA	252.65±6.06 bAB	39.63±0.51 bA
	华鑫	2.19±0.05 bB	65.68±0.32 dC	234.24±1.37 cB	38.28±0.49 cB
	湘林 210	2.19±0.05 bC	80.60±1.55 bB	201.04±0.67 eC	34.27±0.19 dB
	衡东大桃 2 号	2.18±0.04 bC	97.25±0.96 aB	284.66±3.25 aB	39.13±0.45 bA
红壤 Red soil	华硕	3.74±0.17 aA	97.72±1.88 bA	303.44±6.80 aA	42.98±0.78 bA
	华金	1.78±0.25 cC	76.23±0.58 dA	246.88±5.21 cB	35.95±0.32 cC
	华鑫	2.62±0.06 bA	104.71±2.15 aA	286.62±1.73 bA	46.56±0.24 aA
	湘林 210	2.37±0.03 bB	89.59±2.01 cA	216.74±4.08 eB	30.65±0.15 eC
	衡东大桃 2 号	2.68±0.05 bB	67.62±0.86 eC	222.49±3.92 dC	32.12±0.21 dC

量整体以酸性紫色土中较高，其中‘华金’的含量最高；‘衡东大桃 2 号’在红壤中的含量显著高于该土壤下的其他品种（$P < 0.05$）。可溶性糖含量在各处理间差异显著（$P < 0.05$），以红壤中的‘华鑫’为最高；‘华金’在红壤和碱性紫色土中的含量显著低于其在酸性紫色土中的含量。各处理中，丙二醛含量整体以碱性紫色土最高，表明在该土壤环境下植株遭受了更严重的膜脂过氧化损伤。其中，‘华硕’在碱性紫色土中的积累量最高，显著高于红壤和酸性紫色土（$P < 0.05$）；最低值为酸性紫色土的‘华鑫’，显著低于大部分处理（$P < 0.05$）。在红壤和碱性紫色土中，‘华硕’的游离脯氨酸含量均最高，且显著高于碱性紫色土中含量最低的‘华金’（$P < 0.05$）。

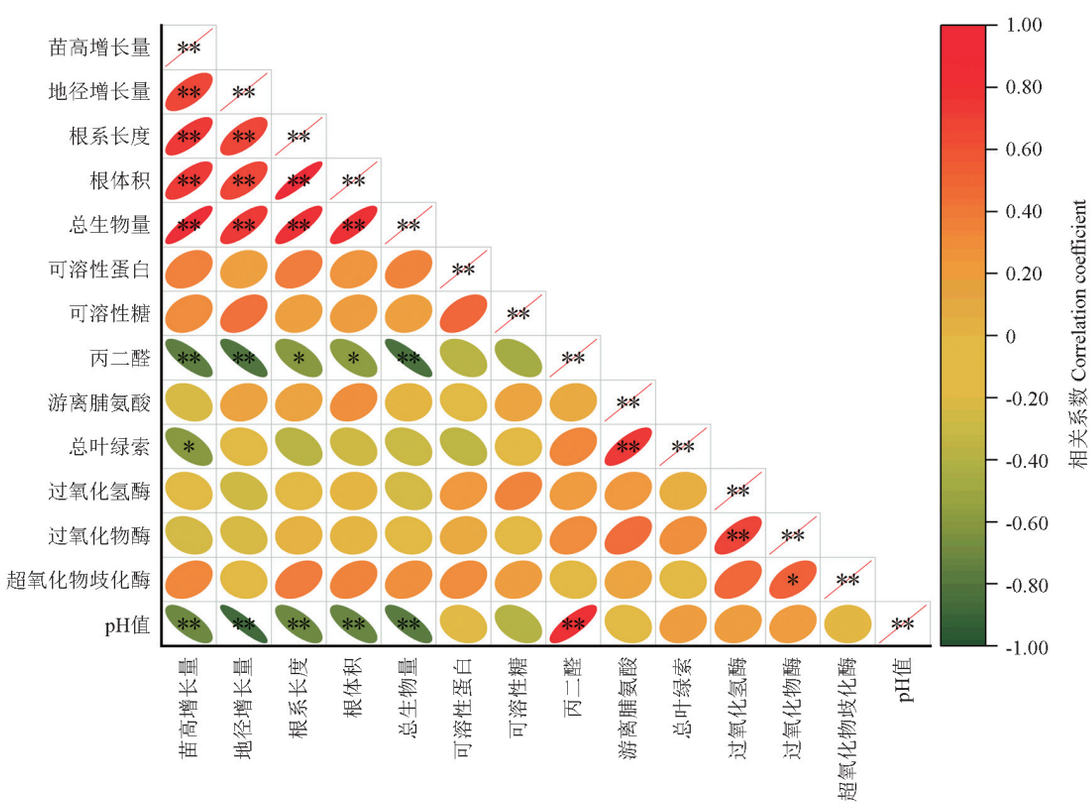
2.2.2　不同土壤类型对油茶光合色素与抗氧化酶活性的影响

如表 3 所示，‘华硕’在 3 种土壤中的总叶绿素含量均最高，显著高于‘华金’在碱性紫色土的最低值（$P < 0.05$）。不同处理间的 3 种抗氧化酶活性存在显著差异（$P < 0.05$）。红壤‘衡东大桃 2 号’的 CAT 活性最高，‘华金’的 CAT 活性在 3 种土壤类型中均处于较低水平。红壤‘衡东大桃 2 号’的 POD 活性最高，比酸性土下的‘湘林 210’高出 53.7%。碱性紫色土‘华鑫’的 SOD 活性最高，显著高于红壤下的‘华硕’（$P < 0.05$）。

2.3　不同土壤类型下油茶适应性的综合评价

2.3.1　不同土壤类型下油茶各指标相关性分析

由图 2 可以看出，苗高增长量、地径增长量、根系长度、根体积及总生物量等生长指标间均呈极显著正相关（$P < 0.01$），表明植物生长指标间存在显著的正向资源分配关系，且均与 pH 值呈极显著负相关（$P < 0.01$），说明高 pH（碱性紫色土）抑制植物生长。在生理指标与生长胁迫方面，丙二醛与苗高增长量、地径增长量、总生物量均呈极显著负相关（$P < 0.01$），与根系长度和根体积呈显著负相关（$P < 0.05$），说明膜脂过氧化严重抑制生长，且与土壤 pH 值呈极显著正相关（$P < 0.01$）。总叶绿素与苗高增长量呈显著负相关（$P < 0.05$），与游离脯氨酸呈极显著正相关（$P < 0.01$）。过氧化物酶与过氧化氢酶呈极显著正相关，（$P < 0.01$），与超氧化物歧化酶呈显著正相关（$P < 0.05$），表明它们在清除活性氧（ROS）过程中存在协同作用。



* 表示在 0.05 水平上显著相关，** 表示在 0.01 水平上极显著相关。
* means significant correlation at the 0.05 level and ** means very significant correlation at the 0.01 level.

图 2　不同土壤类型下 5 个油茶主栽品种的生长及生理生化指标相关性分析

Fig. 2　Correlation analysis of growth and physiological and biochemical parameters of five main cultivars of *C. oleifera* under different soil types

2.3.2 隶属函数分析

2.3.2.1 生长指标评价

采用隶属函数法对不同土壤类型下 5 个油茶主栽品种的 5 个生长指标进行评价（表 4），不同处理的平均隶属函数值为 0.057 ～ 0.936。酸性紫色土处理中 5 个品种的平均隶属函数值范围为 0.564 ～ 0.936，均高于对照红壤（0.331 ～ 0.473）和碱性紫色土（0.057 ～ 0.356），其中酸性紫色土‘华硕’的生长指标隶属函数均值最高。碱性紫色土中，‘华金’和‘华鑫’生长指标隶属函数均值排名最高，但整体上低于对照红壤。

2.3.2.2 生理生化指标评价

采用隶属函数法对不同类型土壤类型下 5 个油茶主栽品种 8 个生理生化指标进行评价（表 5），不同处理的平均隶属函数值为 0.186 ～ 0.769。酸性紫色土中，‘华硕’和‘衡东大桃 2 号’的隶属函数均值较高，且‘华硕’高于对照红壤。碱性紫色土环境下，‘华硕’和‘华鑫’抗氧化酶活性均较高，但‘华硕’MDA 含量最高，‘华鑫’MDA 含量相对较低，且生长及生理生化指标的隶属函数均值在碱性紫色土中排名均较高。

表 4 不同土壤类型下 5 个油茶主栽品种生长指标隶属函数均值及排名

Table 4 Mean membership function values and ranking of growth parameters for five major *C. oleifera* cultivars under different soil types

土壤类型 Soil type	品种 Variety	苗高增长量 Seedling height increment	地径增长量 Ground diameter increment	根系长度 Total root length	根体积 Root volume	总生物量 Total biomass	平均值 Average	排名 Rank
红壤 Red soil	华硕	0.193	0.678	0.291	0.236	0.444	0.368	9
	华金	0.299	0.525	0.182	0.170	0.480	0.331	11
	华鑫	0.701	0.847	0.168	0.090	0.560	0.473	6
	湘林 210	0.508	0.678	0.337	0.239	0.342	0.421	8
	衡东大桃 2 号	0.353	0.639	0.359	0.349	0.540	0.448	7
酸性紫色土 Acidic purple soil	华硕	1.000	0.842	0.850	1.000	0.991	0.936	1
	华金	0.738	0.807	0.907	0.574	0.823	0.770	4
	华鑫	0.834	0.990	0.909	0.565	1.000	0.860	3
	湘林 210	0.754	0.832	0.485	0.213	0.534	0.564	5
	衡东大桃 2 号	0.754	1.000	1.000	0.884	0.663	0.860	2
碱性紫色土 Alkaline purple soil	华硕	0.043	0.361	0.288	0.121	0.185	0.200	13
	华金	0.642	0.203	0.334	0.195	0.406	0.356	10
	华鑫	0.337	0.000	0.281	0.104	0.307	0.206	12
	湘林 210	0.000	0.287	0.000	0.000	0.000	0.057	15
	衡东大桃 2 号	0.059	0.376	0.235	0.061	0.142	0.174	14

表 5 不同土壤类型下 5 个油茶主栽品种生理生化指标隶属函数均值及排名

Table 5 Mean membership function values and ranking of physiological-biochemical parameters for five major *C. oleifera* cultivars under different soil types

土壤类型 Soil type	品种 Variety	可溶性蛋白 Soluble protein	可溶性糖 Soluble sugar	丙二醛 MDA	游离脯氨酸 Free proline	总叶绿素 Total chlorophyll	过氧化氢酶活性 CAT activity	过氧化物酶活性 POD activity	超氧化物歧化酶活性 SOD activity	平均值 Average	排序 Rank
红壤 Red soil	华硕	0.177	0.359	0.348	1.000	1.000	0.116	0.282	0.000	0.410	10
	华金	0.000	0.000	0.328	0.476	0.635	0.038	0.540	0.478	0.312	13
	华鑫	0.672	1.000	0.873	0.118	0.415	0.206	0.107	0.390	0.473	8
	湘林 210	0.387	0.843	0.484	0.663	0.405	0.415	0.559	0.585	0.543	7
	衡东大桃 2 号	1.000	0.820	0.684	0.652	0.520	1.000	1.000	0.477	0.769	1
酸性紫色土 Acidic purple soil	华硕	0.534	0.760	0.918	0.668	0.365	0.359	0.105	0.774	0.560	5
	华金	0.778	0.650	0.959	0.460	0.215	0.253	0.478	0.620	0.552	6
	华鑫	0.739	0.355	1.000	0.321	0.205	0.000	0.307	0.546	0.434	9
	湘林 210	0.620	0.802	0.680	0.209	0.205	0.365	0.000	0.326	0.401	11
	衡东大桃 2 号	0.659	0.636	0.475	0.679	0.200	0.772	0.774	0.593	0.599	4
碱性紫色土 Alkaline purple soil	华硕	0.082	0.558	0.000	0.984	0.980	0.784	0.948	0.804	0.642	2
	华金	0.271	0.000	0.119	0.000	0.000	0.258	0.424	0.418	0.186	15
	华鑫	0.972	0.530	0.102	0.358	0.420	0.955	0.792	1.000	0.641	3
	湘林 210	0.073	0.406	0.234	0.182	0.295	0.585	0.145	0.128	0.256	14
	衡东大桃 2 号	0.842	0.452	0.008	0.417	0.450	0.047	0.199	0.208	0.328	12

2.3.3　主成分分析

本研究 KMO 值为 0.732（＞ 0.6），符合主成分分析的基本要求。选取 8 个代表性生长与生理指标（苗高增长量、地径增长量、根系长度、根体积、总生物量、可溶性蛋白、可溶性糖和丙二醛）进行主成分分析。主成分分析结果表明（表 6），前 2 个主成分累计方差贡献率达 80.103%，其中主成分 1（56.825%）主要表征生长指标，在苗高增长量（0.892）、地径增长量（0.846）、根系长度（0.880）、根体积（0.856）和总生物量（0.938）上具有较高载荷，反映植株整体生长状况；主成分 2（23.278%）则主要体现生理代谢特征，与可溶性蛋白（0.636）、可溶性糖（0.789）正相关，与丙二醛（-0.886）负相关，显示逆境生理响应。基于主成分得分方程和方差贡献率加权，计算得到各品种在不同土壤条件下的综合得分（表 7）。

为直观展示 5 个油茶品种幼苗在 3 种土壤中的适应性差异，将各处理的所有指标进行主成分分析，根据特征值及累计贡献率得到 PCA 得分图（图 3），得分图中距离越相近的数据表示相似性越强，距离越远的点表示相似性越弱，即存在一定的差异性，指标间向量夹角若小于 90°，则呈正相关，否则呈负相关，且夹角余弦值代表 2 个指标的相关系数 [21]。从得分图中可以看出，3 种抗氧化酶与游离脯氨酸的向量方向相近，表明它们之间呈正相关关系，生长指标与可溶性糖、可溶性蛋白的向量方向也相近，呈正相关关系，丙二醛与地径增长量和苗高增长量方向相反，说明它们之间呈明显负相关关系。

表 6　主成分分析
Table 6　Principal component analysis

KMO 和 Bartlett 检验				初始特征值 Initial eigenvalue				成分矩阵 Component matrix	
KMO	Bartlett	df	Sig	成分 Ingredient	特征值 Eigenvalue	方差 Variance /%	累计 Cumulative /%		
0.732	105.563	28	0.000	1	4.546	56.825	56.825	总生物量	0.938
				2	1.862	23.278	80.103	苗高增长量	0.892
				3	0.779	9.748	89.851	根系长度	0.880
				4	0.378	4.747	94.598	丙二醛	-0.886
				5	0.249	3.118	97.716	根体积	0.856
				6	0.109	1.368	99.084	地径增长量	0.846
				7	0.059	0.747	99.831	可溶性糖	0.789
				8	0.010	0.169	100.000	可溶性蛋白	0.636

表 7　主成分综合得分和排名
Table 7　Composite scores and rankings of principal components

土壤类型 Soil type	品种 Variety	主成分得分 Principal component value		综合得分 Comprehensive value	排名 Rank
		F_1	F_2	F	
红壤 Red soil	华硕	-0.20	-0.89	-0.40	9
	华金	-0.12	-1.95	-0.65	12
	华鑫	-0.33	1.43	0.18	6
	湘林 210	-0.33	0.54	-0.08	8
	衡东大桃 2 号	-0.33	1.39	0.17	7
酸性紫色土 Acidic purple soil	华硕	1.73	0.08	1.25	1
	华金	1.05	0.41	0.87	4
	华鑫	1.52	-0.30	0.99	3
	湘林 210	0.15	0.80	0.33	5
	衡东大桃 2 号	1.42	0.12	1.04	2
碱性紫色土 Alkaline purple soil	华硕	-0.89	-0.57	-0.79	14
	华金	-0.08	-1.57	-0.51	10
	华鑫	-1.06	0.77	-0.53	11
	湘林 210	-1.38	-0.77	-1.20	15
	衡东大桃 2 号	-1.16	0.51	-0.68	13

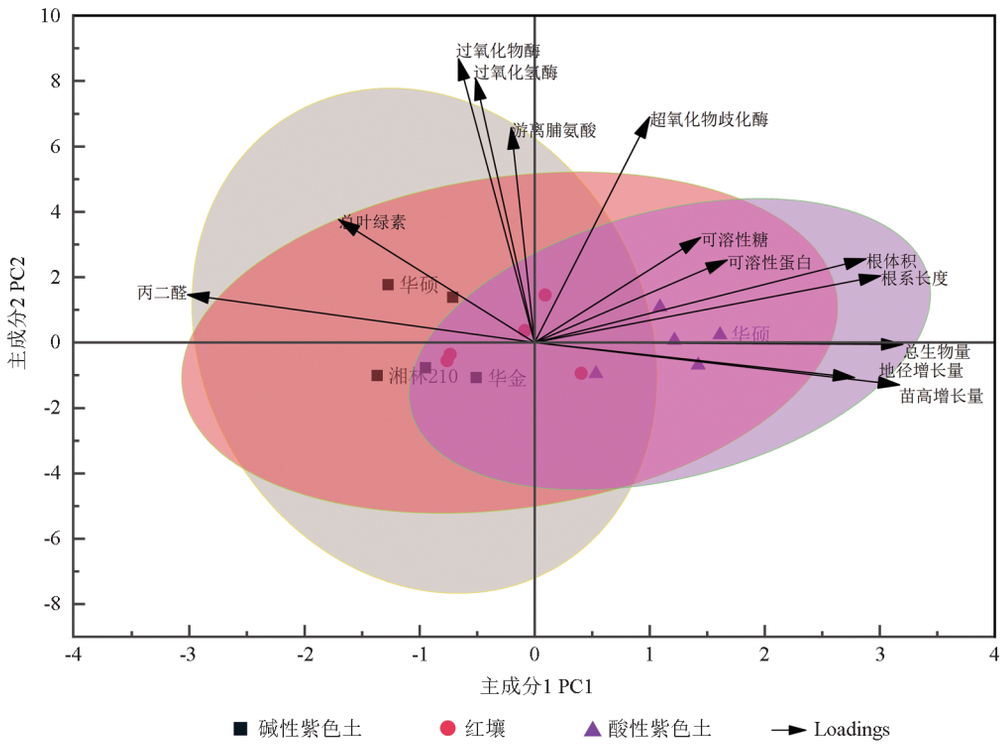


图 3 不同土壤条件下 5 个油茶主栽品种生长及生理生化指标的主成分双标图

Fig. 3 Principal component analysis (PCA) biplot of growth and physiological-biochemical parameters for five major *C. oleifera* cultivars under different soil conditions

3 讨论与结论

3.1 讨 论

苗高与地径是评价苗木生长和抗逆性的关键指标 [22]；根系是植物吸收水分与矿质养分的关键，其形态直接影响地上部生长和产量，是生产力的基础，生物量的高低通常能体现苗木的资源利用效率与环境适应能力 [23]。隶属函数分析结果表明，不同土壤类型对油茶品种生长指标影响显著（$P < 0.05$）。酸性紫色土中的平均隶属函数值（0.564 ～ 0.936）显著高于红壤（0.331 ～ 0.473）和碱性紫色土（0.057 ～ 0.356），说明该土壤更利于油茶幼苗生长，可能与其提供更适宜的养分和 pH 环境有关 [24]。这一结果与王超 [25] 在杨树上的研究结论一致，进一步证实土壤类型对木本植物生长具有显著影响。同一土壤条件下，不同品种间亦存在显著差异（$P < 0.05$）。酸性紫色土中，‘华硕’和‘华鑫’在多数生长指标及生物量上表现优异；‘衡东大桃 2 号’则显示出最优的根系发育特性，其根系长度和根体积显著高于其他品种，表明品种间存在显著的养分吸收与利用能力分化。

对 5 个油茶品种在不同土壤条件下的生理生化指标进行综合分析，结果表明各品种对土壤类型的适应性存在显著差异（$P < 0.05$）。可溶性蛋白与可溶性糖作为渗透调节物质，在逆境中通过积累以维持细胞结构与功能 [26]。本研究发现，酸性紫色土中两者含量均较高，表明该土壤条件可能促进有机物质积累与能量储存，有利于植株生长发育。关于脯氨酸积累与抗逆性的关系，学界主要存在两种解释：一种认为是主动保护机制，植物通过主动积累脯氨酸以维持渗透平衡和稳定蛋白质结构 [27]；另一种则视其为胁迫损伤的被动产物，反映细胞受损后的代谢积累 [28]。丙二醛含量作为评估抗逆性的关键指标，能直观反映细胞膜受损程度 [29]。‘华硕’在红壤和碱性紫色土中的 MDA 与游离脯氨酸含量显著高于酸性紫色土（$P < 0.05$），表明其在非酸性土壤中遭受膜脂过氧化损伤并通过脯氨酸积累响应逆境；而‘华鑫’的 MDA 和脯氨酸含量较低，但 SOD 活性较高，表明其通过高效抗氧化系统减轻损伤，适应性更强。植物体内，SOD、POD 和 CAT 三种酶协同构建酶促抗氧化系统，通过清除活性氧、抑制膜脂过氧化来减轻氧化损伤，维持细胞结构与功能的稳定性 [30]。红壤条件下，‘衡东大桃 2 号’表现出较高的 CAT 活性（$P < 0.05$），显示出较强的过氧化氢清除能力和环境适应性；相比之下，‘华硕’的 CAT 和 POD 活性较低，表明其抗氧化能力较弱。在酸性紫色土中，‘华硕’表现出高 SOD

活性与低 POD 活性，表明其抗氧化协同性不足；‘衡东大桃 2 号’三种抗氧化酶活性整体较高，说明其适应能力较强。碱性紫色土中，‘华鑫’的 CAT 和 SOD 活性均高，说明其对碱性土壤环境适应能力较强；‘华硕’的 POD 活性高但 SOD 活性低，抗碱能力较弱；‘湘林 210’在 2 种紫色土中的 3 种抗氧化酶活性均较低，表明其抗氧化酶系统响应迟缓，导致酶活性受抑，适应能力较差。光合作用是植物生长发育的基础，叶绿素含量显著影响光合效率 [31]。本研究中，酸性紫色土内大多数油茶品种的总叶绿素含量低于红壤和碱性紫色土，可能与其 pH 值过低导致铁等微量元素可利用性降低，进而抑制叶绿素合成有关。叶绿素降解与类囊体膜结构受损进一步削弱光合能力，这与 Aung 等 [32] 的研究结果一致。

本研究基于盆栽试验，结合主成分分析（PCA）与隶属函数法，综合评价油茶品种的生长及生理生化指标。该方法有效克服了单一主成分分析在综合评价与解释性上的不足，更全面解析不同油茶品种在不同土壤环境下的适应差异，具有较高的生物学与现实意义。结果表明，酸性紫色土是油茶幼苗较为适宜的土壤类型，并筛选出‘华鑫’为综合适应性较强的品种，揭示了不同油茶品种在生长、生理及光合特性方面对土壤环境的响应机制。但由于盆栽控制条件与大田实际环境存在差异，加之试验苗木来源、地域气候等因素的影响，所获结果不宜直接推广至不同产区或不同品种的栽培实践。为进一步科学选育与精准栽培，后续应在多种生态区布设区域性大田试验，开展多品种（种源）比较验证，以实现从理论到生产应用的有效衔接，为油茶高产高效栽培提供可靠依据。

3.2　结　论

本研究系统评估了不同土壤类型对湖南主栽油茶品种生长及生理特性的影响，结果表明土壤类型对油茶幼苗生长具有显著影响。其中，酸性紫色土因具备适宜的 pH 环境与均衡养分供应，最有利于油茶幼苗多项生长和生理指标的提升，显著优于红壤和碱性紫色土。品种间适应性存在明显差异：‘华鑫’对 3 种供试土壤的适应性均较高，表现出较强的广适性；‘华硕’最适宜酸性紫色土，在红壤和碱性土中易发生氧化胁迫；‘衡东大桃 2 号’在红壤和酸性紫色土中适应性较好；‘湘林 210’则对 2 种紫色土的适应性均较弱。主成分分析与隶属函数综合评价一致表明，酸性紫色土为油茶生长的最适土壤类型，‘华鑫’为综合适应性最优品种。本研究可为油茶栽培的土壤选择与品种区域化布局提供理论依据，对推动油茶产业可持续发展具有重要参考价值。后续研究可结合大田试验与分子手段，进一步深化紫色土改良机制与油茶抗逆生理研究。

参考文献：

[1] 孟桂元 , 韩杰铖 , 詹兴国 , 等 . 我国油茶产业分析与发展对策 [J]. 中国油脂 ,2021,46(7):104-108,113.
MENG G Y, HAN J C, ZHAN X G, et al. Industry analysis and development strategy of oil-tea camellia in China[J]. China Oils and Fats,2021,46(7):104-108,113.

[2] 国家油茶科学中心 . 油茶高效实用栽培技术 [M]. 北京 : 科学出版社 ,2010.
National *Camellia oleifera* Research Center. Efficient cultivation techniques of *Camellia oleifera*[M]. Beijing: Science Press,2010.

[3] 徐新平 . 油茶种植现状及高产栽培技术分析 [J]. 现代园艺 , 2020,43(15):81-82.
XU X P. Current situation of *Camellia oleifera* cultivation and analysis of high-yield cultivation techniques[J]. Modern Horticulture,2020,43(15):81-82.

[4] 侯阳 . 油茶种植优势及丰产栽培技术探讨 [J]. 南方农业 , 2019,13(29):5-6.
HOU Y. Advantages of *Camellia oleifera* cultivation and discussion on high-yield cultivation techniques[J]. South China Agriculture,2019,13(29):5-6.

[5] 张洋 , 严茂林 , 葛玮玮 , 等 . 我国食用植物油供给现状分析及未来发展战略研究 [J]. 中国油脂 ,2022,47(4):1-8.
ZHANG Y, YAN M L, GE W W, et al. Present situation of edible vegetable oil supply in China and its future development strategy[J]. China Oils and Fats,2022,47(4):1-8.

[6] 栾淑丽 , 任红艳 , 施润和 , 等 . 中国油茶种植适宜性评价及产能提升建议 [J]. 中国农业资源与区划 ,2021,42(10):39-47.
LUAN S L, REN H Y, SHI R H, et al. Evaluation on the suitability of *Camellia oleifera* planting and suggestions for productivity improvement in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2021,42(10): 39-47.

[7] 张菊珠 . 种植油茶防治紫色土水土流失的技术和效益分析 [J]. 南方农业 ,2015,9(9):49-50.
ZHANG J Z. Techniques and benefit analysis of planting *Camellia oleifera* for controlling soil erosion in purple soil[J]. South China Agriculture,2015,9(9):49-50.

[8] 何毓蓉 , 郑霖 , 陈学华 , 等 . 中国紫色土 . 下篇 [M]. 北京 : 科学出版社 ,2003.
HE Y R, ZHENG L, CHEN X H, et al. Chinese purple soil (Part II) [M]. Beijing: Science Press,2003.

[9] 《湖南森林》编辑委员会 . 湖南森林 [M]. 长沙 : 湖南科学技

术出版社 ,1991.
Editorial Committee of Hunan Forest. Hunan forest[M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press,1991.

[10] 何方 . 中国中亚热带荒漠化及其防治 [J]. 中国水土保持 , 2003(5):12-14.
HE F. Desertification and its control in the mid-subtropical zone of China[J]. Journal of Soil and Water Conservation in China, 2003(5):12-14.

[11] 连旭东 , 张璐 , 刘思汝 , 等 . 作物产量对土壤 pH 的响应差异及其影响因素 [J]. 植物营养与肥料学报 ,2023,29(9):1618-1629.
LIAN X D, ZHANG L, LIU S R, et al. Response of crop yield to soil pH and the influencing factors[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2023,29(9):1618-1629.

[12] 刘欣 , 彭道黎 , 邱新彩 . 华北落叶松不同林型土壤理化性质差异 [J]. 应用与环境生物学报 ,2018,24(4):735-743.
LIU X, PENG D L, QIU X C. Differences in soil physiochemical properties between different forest types of *Larix principis-rupprechtii*[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2018,24(4):735-743.

[13] KUMAR S, SHARMA J, ARYA S S, et al. The potential of glycine betaine application to combat Cd and As toxicity in wheat plants by altering photosynthetic, physiological, and antioxidant enzyme indices[J]. Cereal Research Communications,2025,53: 887-901.

[14] 张杨珠 , 周清 , 黄运湘 , 等 . 湖南土壤分类的研究概况与展望 [J]. 湖南农业科学 ,2014(9):31-34,38.
ZHANG Y Z, ZHOU Q, HUANG Y X, et al. General situations and prospects of soil classification in Hunan Province[J]. Hunan Agricultural Sciences,2014(9):31-34,38.

[15] 魏静 , 谭星 , 王昌盛 , 等 . 引种美国红枫在两种紫色土区的生长和光合特性比较 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2024,48(1):97-105.
WEI J, TAN X, WANG C S, et al. Comparison of growth and photosynthetic characteristics of introduced *Acer rubrum* in two purple soil[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition),2024,48(1):97-105.

[16] 张文 , 李林珂 , 吴焦焦 , 等 . 引种玫瑰营养生长对重庆市 3 种土壤类型的响应 [J]. 重庆师范大学学报 (自然科学版), 2020,37(3):138-144.
ZHANG W, LI L K, WU J J, et al. Response of vegetative growth of introduced roses to three soil types in Chongqing[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science),2020,37(3): 138-144.

[17] 王学奎 , 黄见良 . 植物生理生化实验原理与技术 [M].3 版 . 北京 : 高等教育出版社 ,2015.
WANG X K, HUANG J L. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press,2015.

[18] 保倩倩 . 干旱胁迫对黄麻生长和番茄种子萌发的影响研究 [D]. 昆明 : 云南大学 ,2018.
BAO Q Q. Effects of drought stress on the growth of jute and the germination of tomato seeds[D]. Kunming: Yunnan University, 2018.

[19] 李合生 , 孙群 , 赵世杰 , 等 . 植物生理生化试验原理和技术 [M]. 北京 : 高等教育出版社 ,2000.
LI H S, SUN Q, ZHAO S J, et al. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. Beijing: Higher Education Press,2000.

[20] 张亚琴 . 油茶叶片生理与小枝发育对林下光环境的响应 [D]. 贵阳 : 贵州大学 ,2022.
ZHANG Y Q. Responses of leaf physiology and branch development of *Camellia oleifera* to understory light environment[D]. Guiyang: Guizhou University,2022.

[21] 张雪婷 , 杨文雄 , 柳娜 , 等 . 甘肃西部抗旱型玉米品种的综合评价及筛选 [J]. 核农学报 ,2018,32(7):1281-1290.
ZHANG X T, YANG W X, LIU N, et al. Comprehensive evaluation and screening of drought-resistant maize varieties in western Gansu[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018,32(7):1281-1290.

[22] 彭惠萍 , 蔡宇宇 , 詹丽红 , 等 . 不同遮阴度对红花玉兰 ‘ 娇红 1 号 ’ 生长生理及花期特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(8):41-52.
PENG H P, CAI Y Y, ZHAN L H, et al. Effects of different shading degrees on growth physiology and flowering characteristics of Magnolia wufengensis ‘Jiaohong 1’[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(8):41-52.

[23] 谢然 , 陶冶 , 常顺利 . 四种一年生荒漠植物构件形态与生物量间的异速生长关系 [J]. 生态学杂志 ,2015,34(3):648-655.
XIE R, TAO Y, CHANG S L. Allometric relationship between modular morphology and biomass of four annuals in the Gurbantunggut desert, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,34(3):648-655.

[24] 曾进 , 吴吕奇 , 黄梓明 , 等 . 不同育苗方式对晚松不同种源苗期生长及生物量的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2018,38(5):115-120.
ZENG J, WU L Q, HUANG Z M, et al. Effect on difference of growth and biomass about *Pinus rigida* var. *serotina* in different ways of seeding[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2018,38(5):115-120.

[25] 王超 .5 种土壤类型下美洲黑杨和欧美杨幼树的生长和化学计量特征 [D]. 雅安 : 四川农业大学 ,2018.
WANG C. Growth and stoichiometric characteristics of *Populus deltoides* and *Populus*×*canadensis* Moench in five soil types[D]. Ya’an: Sichuan Agricultural University,2018.

[26] 方志红 , 董宽虎 .NaCl 胁迫对碱蒿可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响 [J]. 中国农学通报 ,2010,26(16):147-149.
FANG Z H, DONG K H. Effects of NaCl stress on soluble

protein contents and soluble carbohydrate contents of *Artemisia cnethifolia*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2010,26(16):147-149.

[27] 王芝权 , 喻方圆 , 施钦 , 等 . 中山杉 407 ThP5CS 和 Thδ-OAT 的克隆及干旱胁迫下的表达分析 [J]. 林业科学研究 ,2018,31(4):126-134.
WANG Z Q, YU F Y, SHI Q, et al. Cloning and expression analysis of *ThP5CS* and *Thδ-OAT* gene in *Taxodium* hybrid 'Zhongshanshan 407' under drought stress[J]. Journal of Forestry Research,2018,31(4):126-134.

[28] 刘娥娥 , 宗会 , 郭振飞 , 等 . 干旱、盐和低温胁迫对水稻幼苗脯氨酸含量的影响 [J]. 热带亚热带植物学报 ,2000,8(3):235-238.
LIU E E, ZONG H, GUO Z F, et al. Effects of drought, salt and chilling stresses on proline accumulation in shoot of rice seedlings[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany,2000,8(3):235-238.

[29] 刘畅 , 孙璐 . 盐碱胁迫对玉米苗期生理指标影响的研究进展 [J]. 种子科技 ,2020,38(11):18-19.
LIU C, SUN L. Research progress on effects of saline-alkali stress on physiological indexes of maize at seedling stage[J]. Seed Science & Technology,2020,38(11):18-19.

[30] WANG S, HU X C, WEI C H, et al. Effects of Di-2-ethylhexyl phthalate on growth, lipid peroxidation and antioxidative enzyme activity in *Dunaliella salina*[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2021,804:042039.

[31] 黄轩 , 李琬婷 , 黄晓霞 , 等 . 铅胁迫对中华常春藤叶绿素含量及荧光特性的影响 [J]. 分子植物育种 ,2019,17(16):5469-5475.
HUANG X, LI W T, HUANG X X, et al. Effects of lead stress on chlorophyll content and fluorescence characteristics of Chinese Ivy (*Hedera nepalensis* var. *sinensis*)[J]. Molecular Plant Breeding,2019,17(16):5469-5475.

[32] AUNG T T, SHI F R, ZHAI Y N, et al. Acidic and alkaline conditions affect the growth of tree peony plants via altering photosynthetic characteristics, limiting nutrient assimilation, and impairing ROS balance[J]. International Journal of Molecular Sciences,2022,23:5094.

[本文编校：吴　彬]

（上接第 33 页）

[19] 侯元凯 , 黄琳 , 杨超伟 , 等 . 文冠果种粒性状相关性 [J]. 东北林业大学学报 ,2011,39(2):107-108.
HOU Y K, HUANG L, YANG C W, et al. Correlation between seed traits of *Xanthoceras sorbifolia*[J]. Journal of Northeast Forestry University,2011,39(2):107-108.

[20] 秦倩 , 王楠楠 , 李金花 , 等 . 油橄榄品种表型和 SSR 标记的多样性及聚类分析 [J]. 林业科学研究 ,2016,29(5):676-681.
QIN Q, WANG N N, LI J H, et al. Diversity and cluster analysis on phenotypic traits and SSR of olive cultivars[J]. Forest Research,2016,29(5):676-681.

[21] LIN P, WANG K L, WANG Y P, et al. The genome of oil-camellia and population genomics analysis provide insights into seed oil domestication[J]. Genome biology,2022,23:14.

[22] 李思琪 , 张文臣 , 杨柳 , 等 . 基于 SSR 标记的文冠果遗传多样性分析及指纹图谱构建 [J]. 生物技术通报 ,2024,40(5):74-83.
LI S Q, ZHANG W C, YANG L, et al. Genetic diversity analysis and DNA fingerprint construction based on SSR markers for *Xanthoceras sorbifolia*[J]. Biotechnology Bulletin,2024,40(5):74-83.

[23] 邵雯雯 , 范国祯 , 何知舟 , 等 . 多地同质园实验揭示普通野生稻的表型可塑性与本地适应性 [J]. 生物多样性 ,2023,31(3):109-116.
SHAO W W, FAN G Z, HE Z Z, et al. Phenotypic plasticity and local adaptation of *Oryza rufipogon* revealed by common garden trials[J]. Biodiversity Science,2023,31(3):109-116.

[24] DE VILLEMEREUIL P, GAGGIOTTI O E, GOUDET J. Common garden experiments to study local adaptation need to account for population structure[J]. Biodiversity Science,2022,110:1005-1009.

[25] 兗攀 , 王久照 , 姜继元 , 等 . 文冠果幼树树形培养及花序调控效果 [J]. 新疆农业科学 ,2021,58(6):1095-1105.
YAN P, WANG J Z, JIANG J Y, et al. Experimental study on the tree shape culture and inflorescence regulation of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2021,58(6):1095-1105.

[本文编校：吴　彬]