

# 基于生理指标的樟树健康状况评价

戴坚 黄华毅 高成龙 高晨莹 陈刘生\* 崔高峰\*

(广东省林业科学研究院, 广州森林培育与保护利用重点实验室, 广东广州 510520)

**摘要:** 樟树 *Camphora officinarum* Nees 的健康状况是其经济、景观、生态和人文价值得以发挥的前提。采用客观的方法进行樟树健康状况评价, 对加强树木管理和实现其多重价值具有重要意义。本研究通过室内盆栽试验检测 27 个生理生化指标在樟树不同健康状态下(健康、亚健康、衰弱)的变化情况, 并从中筛选出 23 个指标进行室外采样检测。通过相关性分析和主成分分析, 最终确定了含水率、总蛋白含量、可溶性糖含量、类黄酮含量、丙二醛含量、赤霉素含量、脱落酸含量、过氧化物酶活性、过氧化氢酶活性、叶片厚度、上表皮细胞厚度、下表皮细胞厚度和栅栏组织厚度 13 个关键指标, 建立了樟树个体健康评价模型:  $F=0.378F_1+0.315F_2+0.199F_3+0.109F_4$ , 并调整了综合分值 F。本研究建立的涵盖健康、亚健康、衰弱和濒危 4 个等级的樟树健康评价方法具有客观性、准确性和可行性, 为樟树和古树的健康状况评价及科学养护提供了新的思路和实践指导。

**关键词:** 樟树; 生长状况; 生理指标; 评价; 主成分分析

中图分类号: S792.23 文献标识码: A 文章编号: 2097-5279(2026)01-0087-12

## Health status evaluation of *Camphora officinarum* based on physiological indexes

Dai Jian Huang Huayi Gao Chenglong Gao Chenying Chen Liusheng\* Cui Gaofeng\*

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization, Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China)

**Abstract:** The health status of *Camphora officinarum* Nees is the prerequisite for realizing their economic, landscape, ecological, and cultural values. Employing objective methods for assessing their health is important for improving tree management and achieving their multiple values. In this study, a pot experiment was conducted to examine changes in 27 physiological and biochemical indicators under different health states (health, sub-health, weak) of *C. officinarum*. Subsequently, 23 selected indicators were tested through outdoor sampling. Finally, 13 key indicators were ultimately identified using correlation analysis and principal component analysis, namely, moisture content, total protein content, soluble sugars content, flavonoids content, malondialdehyde content, gibberellin content, abscisic acid content, peroxidase activity, catalase activity, leaf thickness, upper epidermal thickness, lower epidermal cell thickness, and palisade thickness. An individual health evaluation method for *C. officinarum* was derived as  $F=0.378F_1+0.315F_2+0.199F_3+0.109F_4$ , along with an adjusted comprehensive score F. It includes four grades of health status, i.e. healthy, sub-healthy, weak, and endangered, which was demonstrated to be objective, accurate and feasible. The results provide new ideas and practical guidance for the health evaluation and scientific maintenance of *C. officinarum* and ancient trees.

**Keywords:** *Camphora officinarum* Nees; health status; physiological indexes; evaluation; principal component analysis

樟 *Camphora officinarum* Nees 是樟科 Lauraceae 樟属 *Camphora* 常绿大乔木, 在我国主要分布于亚热带区域, 是岭南地区的代表树种之一。樟树具有重要的经济、景观和生态价值 (Luo et al., 2014; Camargo et al., 2018; 崔钰涵, 2025; 涂白连等, 2025), 其木质细密坚韧、有防蛀效果, 多用于高端家具和乐器等的制作。

樟树的根、枝、叶、果实富含精油成分, 可入药, 具有祛风散寒、强心镇痉和杀虫等功能, 同时可产出樟脑、芳樟醇、 $\alpha$ -松油醇和柠檬醛等优质的芳香性物质, 广泛用于医药和香料等产业。因其树形优美、香气清新, 常作为行道树和庭荫树栽种, 调节气候、净化空气。此外, 樟树寿命较长, 可达千年以上, 古樟树在

收稿日期: 2025-10-29; 修回日期: 2025-11-30。

基金项目: 广东省林业局科技项目(2023KJCX022)。

\* 通信作者: 陈刘生 (E-mail: lshchen2008@163.com), 研究员。

崔高峰 (E-mail: cuigf\_gdaf@126.com), 副研究员。

引文格式: 戴坚, 黄华毅, 高成龙, 等. 2026. 基于生理指标的樟树健康状况评价[J]. 树木医学, 3(1): 87-98.

Dai J, Huang H Y, Gao C L, et al. 2026. Health status evaluation of *Camphora officinarum* based on physiological indexes[J]. Tree Health, 3(1): 87-98.

南方分布广泛,承载着丰富的生态和环境信息,具有重要的人文和历史价值(Erre et al., 2010; Duan et al., 2015; 杨娱等, 2019)。樟树的生长状态不仅受生长环境、管护措施等影响,还有樟巢螟 *Orthaga achatina* Butler、肉桂双瓣卷蛾 *Polylopha cassiicola* Liu et Kawabe 等害虫和炭疽病 [*Glomerella cingulata* (Stonem.) Spauld. et Schrenk]、枝枯病 (*Cytospora cinnamomi* Turconi) 等病害的威胁(赵丹阳等, 2016; Chen et al., 2021)。此外,古树还面临生理机能衰退等多种问题。因此,其健康状况对树木品质、物质产出和价值实现等至关重要。

树木健康评价是对森林或某种树木的生态健康状况进行评估和判定,既是环境保护和生态系统批量管理的重要工具,也是了解树木当前状况、识别潜在致病因子的重要手段(袁菲等, 2012)。自20世纪的80、90年代起,国外已开始采用综合评级法(Summary rating, SR)预测树木的健康状况(Hickman et al., 1995)。该方法涉及土壤、风力、根系、树干和倾斜度等9项指标,各项指标采用1~5分制评分,分数越高表示树木越衰弱,所有指标评分相加得出的综合评分(SR)可预测树木倒伏风险,从而及时制定养护计划。至今,很多研究人员仍在沿用该方法进行研究(刘光金等, 2014; 冯发玉等, 2024; Liu et al., 2025)。目前,国内的树木健康评价方法主要有主成分分析法和层次分析法。主成分分析法对多项指标数据进行降维和系统聚类分析,通过线性变换将原始的多维相关变量转化为少数几个不相关的主成分。该方法注重数据的简化和特征提取,研究人员主要将其应用于对树木的树高、胸径、冠幅、枝叶茂密度、树势等多种表现性状指标的分析,但这类指标采用目测评估的方法,存在一定的主观性和局限性(赵小亮等, 2008; 陈文静等, 2022; Fu et al., 2025)。层次分析法通过将问题分解为目标、规则和方案等层次,逐层比较不同因素的重要性,最终确定各指标的权重,侧重于专家决策过程的逻辑性和权重分配的合理性。目前在树木健康评价时,常按照树冠、树干、根部等主结构层划分,再细分二级和三级指标层,并通过建立判断矩阵、叠加每级指标的权重后对树木健康做出判断,但指标选取和权重确定存在较大的主观性(游惠明等, 2009; 翁殊斐等, 2009; 李琳, 2020)。随着研究的发展,树木健康评价方法中的指标数量和类型也在发生变化(郭文婷等, 2025)。例如:Stravinskienė等(2018)在研究中增加了对落叶率和枯枝数的检测; Bertolin等(2021)考虑了风力因素对树木健康的影响,评估动态风的加速度以便预测树木的倒伏风险等。

现有研究表明,当前树木健康评价指标仍主要集中于树木表观现象,尽管有大量关于植物生理生化因子的研究,但这些因子鲜有被纳入健康诊断体系(池敏杰等, 2010; 文超等, 2023)。本研究以樟树为例,通过室内盆栽试验,探究不同健康状况下物质含量、叶片形态、元素组成等生理生化指标的变化,结合室外大树、古树生理指标检测,筛选关键指标,建立客观合理的健康评价方法,旨在为樟树个体健康评价和古树名木健康监测提供参考,并为提升树木高质量健康管理提供理论基础和实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料采集与处理

室内盆栽试验在广东省林业科学研究院苗圃内(23°11'N, 113°22'E)进行,供试的2年生香樟盆栽苗购于广州德源林业有限公司。选取生长状态接近的盆栽苗,株高为(103.0 ± 2.8) cm,冠幅为(35.2 ± 1.4) cm,设置健康、亚健康 and 衰弱3种状态的模拟处理组。具体处理方式如下:健康组每日上、下午各浇水1次;亚健康组每3 d上、下午各浇水1次;衰弱组每7 d上、下午各浇水1次。每次浇水量为1 L/株,每组重复处理10株,其他管理措施保持一致(图1)。处理21 d后开始采样,采回的样品清洗后,用滤纸吸干表面水分备用。

室外样品采集工作在广东省珠海市会同古树公园内(21°48'N, 113°03'E)进行,随机选取21株樟树(含大树和古树,编号Z1~Z21)。采样部位为植株有叶区域中段(避开顶部嫩叶和基部老叶),在同一水平面的东、南、西、北4个方位均匀采集叶片,每株样品采集约60片。参考《古树名木健康巡查技术规范》(DB4401/T 126—2021)中对生长状况、生长环境、生物因子等健康评价指标的赋分及权重,计算每棵树的综合健康指数(Health index, HI)值。

$$HI = \sum_{i=1}^{19} A_i B_i \quad (1)$$

式中,HI为古树名木健康综合指数; $A_i$ 为第*i*个指标所对应的得分值; $B_i$ 为第*i*个指标所对应的权重。正常  $3.8 < HI \leq 5.0$ ; 衰弱  $2.5 < HI \leq 3.8$ ; 濒危  $0 < HI \leq 2.5$ 。

### 1.2 试验指标测定方法

含水率:随机选取10片大小相近且无病虫害的叶片,先称量其鲜重,然后在55℃条件下烘干至恒重,再称量其干重。依据Weatherley(1950)提出的方法计算叶片的含水率,公式如下:

$$\text{叶片含水率}(\%) = [(\text{叶片鲜重} - \text{叶片干重}) / \text{叶片鲜重}] \times 100 \quad (2)$$



图 1 室内试验中樟树的 3 个处理组

Fig. 1 Three treatments of *C. officinarum* in pot experiments

注: A. 健康组; B. 亚健康组; C. 衰弱组。

Notes: A. Health group; B. Sub-health group; C. Weak group.

根系活力、总蛋白、可溶性糖、总酚、类黄酮、丙二醛 (Malondialdehyde, MDA)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶 (Catalase, CAT)、植物生长素 (Indole acetic acid, IAA)、植物赤霉素 (Gibberellic acid, GA) 和植物脱落酸 (Abscisic acid, ABA), 分别使用上海酶联生物科技有限公司的根系活力 TTC 法检测试剂盒 (ML095008)、考马斯亮蓝蛋白含量微量法测定试剂盒 (ML093075)、植物可溶性糖微量法测定试剂盒 (ML093065)、植物总酚微量法测定试剂盒 (ML095235)、植物类黄酮微量法测定试剂盒 (ML095245)、MDA 微量法测定试剂盒 (ML094965)、过氧化物酶活性微量法测定试剂盒 (ML095204)、超氧化物歧化酶活性微量法测定试剂盒 (ML092620)、过氧化氢酶活性微量法测定试剂盒 (ML095270)、生长素 ELISA 试剂盒 (ML147100-2)、赤霉素 ELISA 试剂盒 (ML072782) 和脱落酸 ELISA 试剂盒 (ML077235) 进行检测。

组织形态: 每个植株取 5~8 片叶片, 采用垂直叶脉横切法取得横截组织, 浸泡在 70%FAA 固定液 (武汉赛维尔生物) 中, 交由武汉赛维尔生物科技有限公司完成石蜡切片操作。使用 Image-Pro Plus 6.0 软件 (Media Cybernetics 公司, 美国) 测量叶片厚度 (leaf thickness, LT)、上表皮细胞厚度 (upper epidermal thickness, UET)、下表皮细胞厚度 (lower epidermal thickness, LEF) 和栅栏组织厚度 (palisade thickness, PT), 每个样本重复测量 10 次, 不同重复间的测量误差范围为 1.0~3.0  $\mu\text{m}$  (王彩艳等, 2025; 侯孟月等, 2023)。

营养元素: 每个植株选取无病虫害的叶片 15~30 片, 交由南京维百瑞检测技术有限公司进行检测。检测指标包括氮 (N)、磷 (P)、钾 (K)、钙 (Ca)、镁 (Mg)、铜 (Cu)、锌 (Zn)、铁 (Fe)、硼 (B)、锰 (Mn) 等元素的含量。检测方法参照《食品中多元素的测定》(GB

5009.268—2016) 和《植物中氮、磷、钾的测定》(NY/T 2017—2011)。其中: 植物全氮的测定采用凯氏定氮法, 使用自动定氮仪 (上海沛欧分析仪器有限公司, 型号 SKD-1100) 进行检测; 其他元素的测定采用同位素内标法, 使用电感耦合等离子体质谱仪 (美国 PerkinElmer 公司, 型号 NexION®1000) 进行检测。

### 1.3 相关性分析方法

线性相关系数又叫皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient), 用  $r$  表示。0.8< $|r|$ ≤1 为极强相关, 0.6< $|r|$ ≤0.8 为强相关, 0.3< $|r|$ ≤0.6 为中度相关, 0< $|r|$ ≤0.3 为弱相关。公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

式中:  $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ ,  $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$ 。

### 1.4 主成分分析方法

主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 中, 主成分  $F$  与观测指标变量  $X$  之间的线性组合表达式如下:

$$F_p = u_{1p}X_1 + u_{2p}X_2 + \dots + u_{pp}X_p \quad (4)$$

式中,  $p$  为主成分的个数,  $u$  为各观察指标变量的系数。

参考陈文静等 (2023) 的方法对试验数据进行 Z-Score 标准化处理, 然后进行取样适切度 (Kaiser-Meyer-Olkin measure of sampling adequacy, KMO) 和 Bartlett 检验评估。若 KMO>0.5 且 Bartlett 检验  $P<0.05$ , 表明数据间具有良好的相关性, 满足主成分分析的适用条件。结合 Kaiser 准则, 选取标准化数据下初始特征值>1 的值为提取标准。得到的载荷系数 (需>0.5, 若>0.7 则为显著载荷) 除以各成分特征值的算术平方根可计算出主成分系数, 公式如下:

各主成分系数 = 载荷系数 /  $\sqrt{\text{各成分特征值}}$  (5)

得到各主成分得分数据后, 以主成分对应的方差贡献率为权数可计算总得分, 公式如下:

$$F = \frac{\lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2 + \dots + \lambda_i F_i}{\sum_{i=1}^i \lambda_i} \quad (6)$$

式中  $i$  为主成分个数,  $\lambda_i$  为第  $i$  个主成分对应的方差贡献率,  $F$  为综合分值。

### 1.5 数据分析

使用 Excel (Microsoft, 美国) 和 Prism 9.0 (GraphPad, 美国) 整理数据及作图, 利用在线软件 SPSSAU ([https://](https://spssau.com/indexs.html)

[spssau.com/indexs.html](https://spssau.com/indexs.html), 北京青丝科技有限公司) 进行单因素方差分析 (One-way ANOVA)、相关性分析及主成分分析等。

## 2 结果与分析

### 2.1 室内健康评价指标的筛选

依据检测指标的类别, 将用于室内健康评价的 27 个指标, 大致分为物质含量、植物激素、酶类活力、组织结构、元素含量 5 大类。具体检测结果如表 1 所示。

表 1 樟树苗室内健康检测指标数据汇总表

Tab. 1 Summary table of indoor health monitoring indicators for *C. officinarum*

分类 Group	检测指标 Detection indicator	健康 Health	亚健康 Sub-health	衰弱 Weak	趋势 Trend
物质含量 Material content	含水率/%	59.57±4.58Cc	48.63±1.70Bb	27.93±1.29Aa	下降
	总蛋白/(mg·mL <sup>-1</sup> )	0.05±0.01Aa	0.05±0.02Aa	0.09±0.00Bb	上升
	可溶性糖/(mg·mg <sup>-1</sup> )	2.99±0.11Aa	13.60±0.44Bb	4.53±0.16Aa	上升
	总酚/(mg·g <sup>-1</sup> )	8.39±0.24Aa	9.01±0.62Aa	10.42±0.05Aa	无
	类黄酮/(mg·g <sup>-1</sup> )	14.11±0.38Aa	50.29±0.52Bb	27.12±11.69ABa	上升
	MDA/(nmol·g <sup>-1</sup> )	24.77±0.52Aa	72.58±1.49Bb	59.17±2.32Bb	上升
植物激素 Plant hormone	根系活力/(μg·h <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> )	24.69±4.83Aa	21.14±2.42Aa	54.26±12.74Bb	上升
	IAA/(μmol·L <sup>-1</sup> )	21.65±0.91Aa	24.79±0.18Aa	22.48±1.85Aa	无
	GA/(nmol·L <sup>-1</sup> )	157.62±7.47Aa	195.24±11.98ABa	226.48±2.69Bb	上升
酶类活力 Enzyme activity	ABA/(μg·L <sup>-1</sup> )	84.04±4.93Aa	103.68±18.90ABa	118.24±9.84Bb	上升
	POD/(U·g <sup>-1</sup> )	12 880.00±240.00Aa	31 893.33±2 088.19Bb	24 440.00±2 868.50ABa	上升
	CAT/(μmol·min <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> )	10.83±3.39Aa	32.44±6.41Bb	22.33±8.50ABa	上升
组织结构 Organization structure	SOD/(U·g <sup>-1</sup> )	150.84±64.00ABa	177.54±40.81Bb	52.59±5.22Aa	下降
	LT/μm	235.32±95.21Aa	219.46±97.04Aa	209.46±81.21Aa	下降
	UET/μm	27.54±4.81Bb	23.66±5.07ABa	20.60±4.61Aa	下降
	LEF/μm	19.20±2.69Bb	13.94±2.12Aa	11.44±3.53Aa	下降
元素含量 Element content	PT/μm	42.64±3.49Aa	57.90±5.92Bb	40.46±4.23Aa	下降
	N/(mg·kg <sup>-1</sup> )	26 534.17±2 091.69Cc	8 425.24±258.85Aa	14 272.96±1 141.57Bb	下降
	P/(mg·kg <sup>-1</sup> )	2 063.98±87.10Cc	1 083.86±94.96Aa	1 696.23±64.98Bb	下降
	K/(mg·kg <sup>-1</sup> )	13 310.54±1 195.52Cc	7 931.16±626.73Aa	10 074.53±779.12Bb	下降
	Ca/(mg·kg <sup>-1</sup> )	10 250.57±1 870.27Aa	17 558.05±445.47Bb	23 379.55±1 343.12Cc	上升
	Mg/(mg·kg <sup>-1</sup> )	3 115.20±271.82Bb	2 345.31±340.7Aa	2 219.06±246.09Aa	下降
	Cu/(mg·kg <sup>-1</sup> )	15.46±0.44Cc	7.42±0.48Aa	10.71±1.32Bb	下降
	Zn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	37.91±2.01Bb	32.39±2.94Aa	37.90±2.14Bb	上升
	Fe/(mg·kg <sup>-1</sup> )	385.09±42.56Aa	510.33±29.5Bb	578.19±14.89Cc	上升
B/(mg·kg <sup>-1</sup> )	26.86±2.15Aa	34.11±3.65Bb	43.12±2.40Cc	上升	
Mn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	112.82±7.42Aa	234.77±43.63Bb	192.13±10.14Bb	上升	

注: 数据均为平均值±标准误的形式, 数据分析采用 One-way ANOVA 方差分析, 使用 Duncan's 新复极差法判断显著性差异, 同行不同大写字母表示达到极显著差异水平 ( $P<0.01$ ), 不同小写字母表示达到显著差异水平 ( $P<0.05$ )。

Notes: Data are presented as mean ± standard error. One-way ANOVA was performed with Duncan's multiple range test to identify the significant differences. Different uppercase letters on the same line denote highly significant differences ( $P<0.01$ ), while different lowercase letters indicate significant differences ( $P<0.05$ ).

物质含量类指标主要包括叶片含水率、总蛋白、可溶性糖、总酚、类黄酮、丙二醛 MDA、根系活力等。叶片含水率随植物状态的衰弱而显著降低, 从健康到亚健康 and 衰弱的过程中, 叶片含水率由 59.57% 显著

减少了 10.94% 和 31.64%; 总蛋白含量在衰弱状态下较其他两种状态显著增加; 可溶性糖含量从健康的 2.99 mg/mg 增加 10.61 mg/mg 后又减少了 9.07 mg/mg; 类黄酮和 MDA 的含量整体呈先上升后下降的趋势;

总酚含量从健康到亚健康 and 衰弱的过程中无显著变化; 根系活力在衰弱状态下达到最高。

植物激素类指标主要包含生长素 IAA、赤霉素 GA 和脱落酸 ABA 等。IAA 含量在树木不同状态下无显著差异; GA 与 ABA 含量均在健康植株衰弱过程中显著上升, 与健康树木相比, 亚健康和衰弱树木的 GA 含量显著增加了 37.62 nmol/L 和 68.86 nmol/L, ABA 含量显著增加了 19.64 μg/L 和 34.20 μg/L。

酶类活力指标主要包括过氧化物酶 POD、过氧化氢酶 CAT 和超氧化物歧化酶 SOD 等。POD 活性由健康到衰弱显著增加了 11 560.00 U/g, CAT 活性先显著增加 21.61 μmol/min·g 后降低 10.11 μmol/min·g; SOD 活性在衰弱状态下较健康时显著降低 98.25 U/g。

组织结构类指标主要包含 LT、UET、LEF 和 PT 等。LT 在樟树衰弱的过程中没有发生显著变化; 衰弱状态下 UET 较健康时显著下降了 6.94 μm; LEF 随着植物健康程度的下降而降低; 亚健康状态较健康状态 PT 显著增加 15.26 μm。

元素含量类指标主要包含 N、P、K、Ca、Mg、Cu、Zn、Fe、Mn 和 B 等。与健康树苗相比, 亚健康时 N、P、K、Cu、Zn 的含量大幅降低, Ca、Fe、B 的含量显著增加; Mg 的含量由健康到亚健康的显著减少 769.89 mg/kg; 亚健康和衰弱状态下 Mn 的含量较健康的显著增加 121.95 mg/kg 和 79.31 mg/kg。

通过数据比对分析可知, 总酚和 IAA 在不同健康状态间没有显著差异, 与树木状态相关性不强;

SOD 和根系活力在健康和亚健康状态下变化不大, 并且在取样时对根系进行操作会损伤树木, 易使结果产生偏差。因此, 去掉总酚、根系活力、IAA 和 SOD, 采用剩余 23 个指标进行室外样品检测。

### 2.2 室外健康评价指标相关性分析

对樟树室外样品 23 个指标的检测结果进行相关性分析, 依照方法 1.3 中关于  $r$  的定义, 只观察中度相关及以上的数据, 由图 2 可知: MDA、POD 与含水率呈强负相关, GA、ABA 和 CAT 与含水率呈中度负相关, 形成含水率与其负相关因子模块 (MDA、GA、ABA、POD、CAT)。GA、ABA、POD 和 CAT 与 MDA 呈中度正相关, CAT 和 POD 与 GA 呈中度正相关, CAT 与 POD 呈中度正相关。UET 和 PT 与 LT 呈强正相关, LEF 与 LT 呈中度正相关, LEF 和 PT 与 UET 呈中度正相关, PT 与 LEF 呈中度正相关, 形成叶片组织形态正相关因子模块。类黄酮与总蛋白含量和可溶性糖含量均呈中度正相关, 形成物质含量正相关因子模块。各因子模块间也存在一定关联, 例如, UET 与可溶性糖呈中度负相关, LEF 与类黄酮呈中度正相关, LEF 与 MDA 呈中度负相关等。此外, 部分元素也与这些因子存在相互关联。例如, N 与 ABA 呈中度正相关, P 与 POD 呈中度正相关, K 与类黄酮和 PT 均呈中度负相关, Mg 和 Fe 与总蛋白含量呈中度负相关, Mn 和 Zn 分别与可溶性糖呈中度正相关和负相关; B 与 UET、LEF、PT 均呈中度正相关。

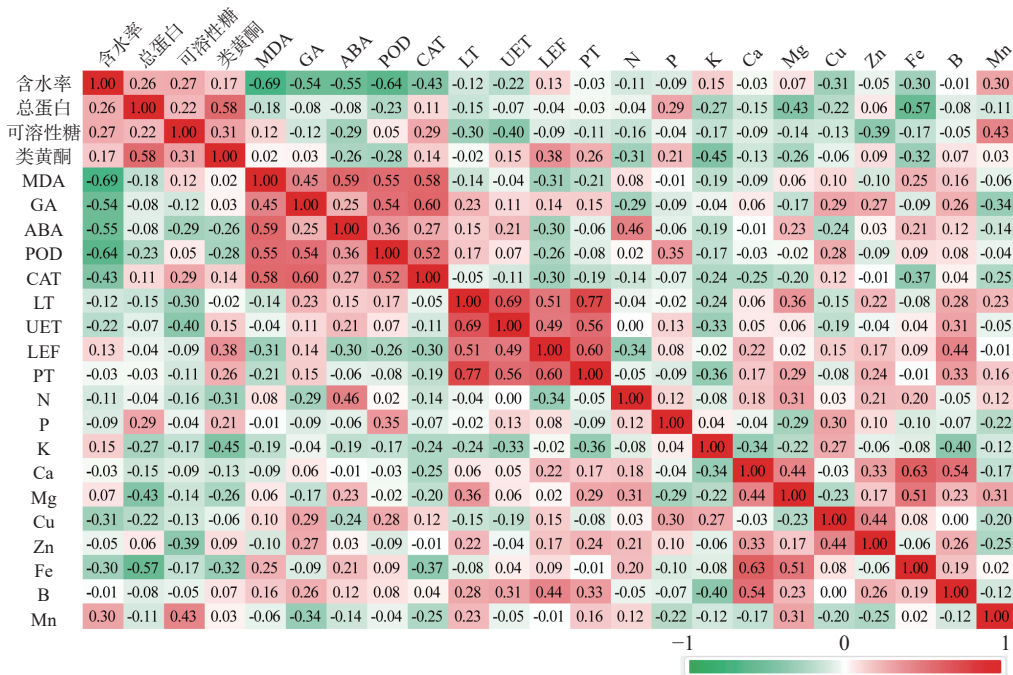


图 2 樟树室外样品各指标相关性分析热图

Fig. 2 Heatmap of correlation analysis for various indicators in outdoor samples from *C. officinarum*

综合而言,含水率、总蛋白、可溶性糖、类黄酮、MDA、GA、ABA、POD、CAT、LT、UET、LEF和PT作为健康状态评价的关键性指标。21株樟树13个关键指标检测结果如表2所示。共13个指标与樟树健康状态间具有较强关联性,可

表2 樟树室外样品各指标检测数据汇总表

Tab. 2 Summary table of test data for various indicators of outdoor samples from *C. officinarum*

检测指标 Detection Indicator	含水率 /%	总蛋白 /(mg·mL <sup>-1</sup> )	可溶性糖 /(mg·mg <sup>-1</sup> )	类黄酮 /(mg·g <sup>-1</sup> )	MDA /(nmol·g <sup>-1</sup> )	GA /(nmol·L <sup>-1</sup> )	ABA /(μg·L <sup>-1</sup> )
Z1	55.86±2.03	167.45±0.60	10.05±1.27	14.30±1.25	32.44±7.23	188.22±16.29	60.60±6.35
Z2	56.20±4.07	170.58±0.92	11.04±0.33	14.50±0.92	33.10±1.20	125.36±21.63	69.55±3.28
Z3	54.87±1.94	181.43±14.78	10.40±0.41	14.61±0.27	23.66±5.03	107.07±8.99	81.24±12.40
Z4	51.77±1.97	160.01±4.91	10.05±0.19	6.62±0.97	28.23±3.09	149.82±9.22	93.69±5.25
Z5	51.70±3.20	128.64±3.12	5.40±0.46	5.26±0.84	32.09±5.08	126.67±6.39	114.17±10.21
Z6	59.90±2.19	152.96±2.00	9.23±0.27	14.95±0.48	49.55±6.06	137.54±0.09	104.53±0.58
Z7	57.33±3.79	167.90±14.63	11.08±0.40	13.83±0.81	54.77±0.29	119.05±2.35	92.72±10.15
Z8	48.37±2.02	96.76±2.13	7.92±0.86	4.96±0.34	77.96±1.07	168.99±8.19	112.83±9.23
Z9	48.13±4.71	80.82±5.59	11.26±0.23	9.56±1.32	66.74±2.09	223.21±22.85	117.53±1.45
Z10	42.50±3.55	86.97±8.83	5.99±0.99	7.65±0.71	60.59±7.44	152.08±4.98	136.97±13.04
Z11	45.06±2.68	50.84±15.45	11.08±0.29	9.01±1.83	58.65±1.30	194.06±6.01	89.20±10.01
Z12	37.56±3.06	93.34±14.88	11.92±0.33	12.15±0.58	95.57±4.56	183.53±13.54	93.75±4.38
Z13	40.77±2.26	114.17±3.71	10.18±1.17	9.83±1.21	67.97±9.46	149.5±15.18	131.15±6.06
Z14	40.36±5.20	207.12±9.56	9.17±0.79	14.20±0.23	71.55±4.14	216.97±16.58	121.13±6.46
Z15	40.22±3.16	123.03±2.91	6.39±0.50	8.61±0.62	56.95±3.38	186.27±8.96	102.89±5.20
Z16	50.54±2.42	73.28±5.07	10.38±1.11	5.63±1.52	60.03±1.66	92.98±7.92	103.75±2.90
Z17	53.30±3.86	78.96±4.21	6.91±1.49	5.56±0.61	30.53±1.98	185.76±19.72	81.66±8.40
Z18	49.48±2.23	40.39±4.69	7.74±0.37	6.29±0.99	28.75±3.17	121.35±25.30	72.47±11.07
Z19	45.50±3.79	71.72±1.98	4.60±0.66	14.09±0.69	52.27±5.48	145.81±20.60	94.08±6.11
Z20	59.80±4.06	92.20±4.29	13.04±0.47	9.46±2.96	35.34±5.22	87.02±13.37	79.95±1.50
Z21	48.43±5.66	36.14±3.51	7.87±0.43	8.89±2.13	51.11±7.43	192.33±11.69	104.03±12.97

检测指标 Detection Indicator	POD /(U·g <sup>-1</sup> )	CAT/ (μmol·min <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> )	LT /μm	UET /μm	LEF /μm	PT /μm
Z1	13 733.33±400.67	15.16±2.42	456.57±127.38	34.24±6.21	21.68±3.32	119.92±7.68
Z2	14 626.67±914.18	17.07±1.72	433.20±123.69	28.26±2.63	24.17±2.85	81.58±6.72
Z3	15 880.00±1 595.49	21.49±2.24	460.50±106.71	38.92±3.56	16.48±2.09	92.21±5.51
Z4	14 426.67±1 545.23	18.37±1.68	468.28±174.92	23.24±5.49	15.40±3.86	91.30±4.17
Z5	14 720.00±1 058.30	10.41±1.83	530.68±216.64	32.34±12.18	16.14±1.72	111.96±11.66
Z6	12 600.00±564.27	10.64±2.87	439.36±140.76	35.56±13.49	17.70±4.72	92.36±6.20
Z7	11 760.00±3 248.88	21.80±1.99	443.72±158.20	22.68±7.82	18.52±3.78	99.46±3.55
Z8	20 746.67±1 884.82	31.66±2.12	388.72±186.68	24.24±5.65	11.30±2.36	55.24±9.06
Z9	21 413.33±1 854.44	27.68±8.35	461.22±121.03	26.58±3.33	18.94±2.56	92.24±1.65
Z10	20 866.67±2 785.77	17.17±2.15	641.2±243.44	59.64±5.60	21.22±7.48	115.54±9.27
Z11	22 226.67±2 101.55	36.79±3.18	464.54±112.44	30.80±3.04	16.56±2.51	91.20±14.77
Z12	24 853.33±2 137.04	24.87±2.30	488.50±146.87	34.94±5.69	17.82±2.81	105.82±8.22
Z13	20 013.33±2 458.40	16.72±2.40	429.38±146.24	30.56±6.08	19.04±4.62	98.58±16.18
Z14	16 133.33±1 142.86	30.67±6.97	496.28±132.78	34.56±9.44	18.12±4.44	91.82±9.50
Z15	28 106.67±1 897.51	19.20±3.28	471.88±152.07	25.92±14.12	14.62±3.12	87.04±7.28
Z16	14 266.67±1 762.88	11.01±2.15	272.30±86.54	18.44±7.50	12.08±3.51	51.64±5.09
Z17	18 333.33±1 105.86	9.50±1.91	519.76±213.76	35.84±7.93	22.26±3.16	85.34±17.67
Z18	11 653.33±423.95	5.40±1.52	463.06±79.53	33.88±4.84	20.92±2.50	103.46±15.68
Z19	10 066.67±506.49	12.96±3.38	477.60±128.17	36.34±16.6	21.12±3.77	98.28±11.11
Z20	15 986.67±863.79	9.93±1.45	558.78±166.56	29.06±7.75	17.98±3.04	104.78±15.10
Z21	17 933.33±2 491.69	20.79±3.04	602.92±205.60	33.62±11.75	21.56±2.40	121.18±1.78

2.3 室外健康评价指标主成分分析

将樟树室外样品 13 个指标的检测数据标准化处理后进行主成分分析、KMO 检验和 Bartlett 球度检验，结果见表 3。KMO 值为 0.53，Bartlett 检验 *P* 值小于 0.01，表明相关系数矩阵与单位阵有极显著差异，适合进行主成分分析。

表 3 SPSS 中 KMO 和 Bartlett 检验结果  
Tab. 3 KMO and Bartlett's test results in SPSS

Kaiser-Meyer-Olkin 度量结果 Kaiser-Meyer-Olkin measurement result	Bartlett 检验结果 Bartlett test result
0.53	近似卡方值 132.93
	df 78.00
	Sig. 0.00

所有变量的共同方差数据见表 4，“初始”列表表示因子分析初始解下的变量共同方差(变量标准化后方差为 1)，“提取”列表表示采取主成分因子分析法提取因子特征值的共同方差。由表 4 可知，各变量的信息丢失较少，本次提取结果可用。

对 13 个指标数据进行主成分分析后获得特征值、方差贡献率及累计贡献率。由表 5 可知，第 1 主成分

表 4 数据公因子方差

Tab. 4 Data common factor variance

检测指标 Detection indicator	初始 Initial	提取 Extract
含水率	1.00	0.77
总蛋白	1.00	0.79
可溶性糖	1.00	0.70
类黄酮	1.00	0.85
MDA	1.00	0.76
GA	1.00	0.67
ABA	1.00	0.80
POD	1.00	0.73
CAT	1.00	0.78
LT	1.00	0.80
UET	1.00	0.76
LEF	1.00	0.75
PT	1.00	0.77

特征值为 3.8，方差贡献率占比 28.9%；第 2 主成分特征值为 3.1，方差贡献率占比 24.0%；第 3 主成分特征值为 2.0，方差贡献率占比 15.2%；第 4 主成分特征值为 1.1，方差贡献率占比 8.3%。数据维度较高的前 4 个主成分累计方差贡献率达 76.4%(>70%)，因此选取前 4 个主成分作为复合评价指标。

表 5 各主成分特征值及贡献率

Tab. 5 Eigenvalues and contribution rates of each principal component

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Extracting sum of squares of loads		
	总计 Total	方差百分比/% Variance percentage	累计 Aggregate	总计 Total	方差百分比/% Variance percentage	累计 Aggregate
1	3.8	28.9	28.9	3.8	28.9	28.9
2	3.1	24.0	52.9	3.1	24.0	52.9
3	2.0	15.2	68.1	2.0	15.2	68.1
4	1.1	8.3	76.4	1.1	8.3	76.4
5	0.7	5.6	82.0	-	-	-
6	0.7	5.3	87.3	-	-	-
7	0.4	3.4	90.7	-	-	-
8	0.4	2.9	93.6	-	-	-
9	0.3	2.4	96.0	-	-	-
10	0.2	1.5	97.5	-	-	-
11	0.2	1.2	98.7	-	-	-
12	0.1	0.8	99.5	-	-	-
13	0.1	0.5	100.0	-	-	-

原始载荷矩阵如表 6 所示。为了使结果更加清晰，对载荷矩阵进行方差极大正交旋转(表 7)。由表 7 可知：含水率、MDA、GA、POD 和 CAT 在第 1 主成分中有较大载荷，说明该主成分主要反映了树木的胁迫响应信息；LT、UET、LEF 和 PT 在第 2 主成分中有较高载荷，该主成分主要反映了组织健康信息；总蛋白和类黄酮在第 3 主成分中的载荷较高，该主成分与代

谢状况相关；可溶性糖和 ABA 在第 4 主成分中的载荷较高，该主成分则与物质动态调节与信号转导相关。

线性组合系数矩阵表如表 8 所示：

则 4 个主成分  $F_1-F_4$  的计算公式分别为：

$$F_1 = -0.434X_1 - 0.143X_2 - 0.054X_3 - 0.148X_4 + 0.431X_5 + 0.337X_6 + 0.350X_7 + 0.415X_8 + 0.353X_9 + 0.022X_{10} + 0.019X_{11} - 0.197X_{12} - 0.097X_{13};$$

$$F_2 = -0.128X_1 - 0.102X_2 - 0.255X_3 + 0.064X_4 - 0.072X_5 + 0.166X_6 + 0.070X_7 + 0.036X_8 - 0.098X_9 + 0.503X_{10} + 0.472X_{11} + 0.4X_{12} + 0.468X_{13};$$

$$F_3 = 0.022X_1 + 0.444X_2 + 0.407X_3 + 0.597X_4 + 0.141X_5 + 0.234X_6 - 0.138X_7 + 0.025X_8 + 0.369X_9 - 0.011X_{10} + 0.175X_{12} + 0.140X_{13};$$

$$F_4 = -0.077X_1 + 0.519X_2 - 0.389X_3 + 0.223X_4 + 0.091X_5 - 0.219X_6 + 0.513X_7 - 0.268X_8 - 0.100X_9 - 0.086X_{10} + 0.244X_{11} - 0.208X_{12} - 0.112X_{13}。$$

得到的樟树的健康评价模型如下:

$$F = 0.378F_1 + 0.315F_2 + 0.199F_3 + 0.109F_4$$

将每棵樟树各指标标准化后的数据代入计算, 得出的F值建立树木健康综合评价表。为了使数据

表6 载荷矩阵表

Tab. 6 Load matrix table

检测指标 Detection indicator	主成分 Principal constituent			
	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>
含水率	-0.841	-0.227	0.031	-0.080
总蛋白	-0.277	-0.181	0.623	0.540
可溶性糖	-0.105	-0.451	0.571	-0.404
类黄酮	-0.286	0.113	0.839	0.232
MDA	0.834	-0.127	0.198	0.095
GA	0.652	0.294	0.328	-0.228
ABA	0.677	0.124	-0.194	0.533
POD	0.803	0.064	0.035	-0.279
CAT	0.684	-0.173	0.518	-0.104
LT	0.042	0.889	-0.016	-0.089
UET	0.036	0.834	0.000	0.254
LEF	-0.382	0.707	0.246	-0.216
PT	-0.188	0.828	0.197	-0.116

表7 载荷矩阵表(旋转后)

Tab. 7 Load matrix table (after rotation)

检测指标 Detection indicator	主成分 Principal constituent			
	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>
含水率	-0.757			
总蛋白			0.873	
可溶性糖				0.734
类黄酮			0.847	
MDA	0.812			
GA	0.771			
ABA				-0.752
POD	0.795			
CAT	0.822			
LT		0.858		
UET		0.753		
LEF		0.815		
PT		0.876		

注: 表中隐藏了低于0.5的数据。

Notes: Data below 0.5 has been omitted from the table.

表8 线性组合系数矩阵

Tab. 8 Linear combination coefficient matrix

名称 Name	主成分 Principal constituent			
	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>
X <sub>1</sub>	-0.434	-0.128	0.022	-0.077
X <sub>2</sub>	-0.143	-0.102	0.444	0.519
X <sub>3</sub>	-0.054	-0.255	0.407	-0.389
X <sub>4</sub>	-0.148	0.064	0.597	0.223
X <sub>5</sub>	0.431	-0.072	0.141	0.091
X <sub>6</sub>	0.337	0.166	0.234	-0.219
X <sub>7</sub>	0.350	0.070	-0.138	0.513
X <sub>8</sub>	0.415	0.036	0.025	-0.268
X <sub>9</sub>	0.353	-0.098	0.369	-0.100
X <sub>10</sub>	0.022	0.503	-0.011	-0.086
X <sub>11</sub>	0.019	0.472	0.000	0.244
X <sub>12</sub>	-0.197	0.400	0.175	-0.208
X <sub>13</sub>	-0.097	0.468	0.140	-0.112

注: X<sub>1</sub>为含水率, X<sub>2</sub>为总蛋白, X<sub>3</sub>为可溶性糖, X<sub>4</sub>为类黄酮, X<sub>5</sub>为MDA, X<sub>6</sub>为GA, X<sub>7</sub>为ABA, X<sub>8</sub>为POD, X<sub>9</sub>为CAT, X<sub>10</sub>为LT, X<sub>11</sub>为UET, X<sub>12</sub>为LEF, X<sub>13</sub>为PT。

Notes: X<sub>1</sub>, moisture content; X<sub>2</sub>, total protein; X<sub>3</sub>, soluble sugars; X<sub>4</sub>, flavonoids; X<sub>5</sub>, MDA; X<sub>6</sub>, GA; X<sub>7</sub>, ABA; X<sub>8</sub>, POD; X<sub>9</sub>, CAT; X<sub>10</sub>, LT; X<sub>11</sub>, UET; X<sub>12</sub>, LEF; X<sub>13</sub>, PT.

均为正数便于分析, 所计算出的F值均需+2来调整。如表9所示, F值越大, 树木越虚弱。

表9 樟树健康综合评价表

Tab. 9 Table of *C. officinarum* health evaluation

树木编号 Tree number	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	调整F Adjusted F
Z1	-2.34	0.92	1.92	-0.67	1.71
Z2	-2.57	-0.66	1.64	-0.35	1.11
Z3	-1.94	-0.49	1.26	0.82	1.45
Z4	-0.88	-1.25	-0.34	0.03	1.21
Z5	-0.81	0.94	-2.07	1.17	1.70
Z6	-1.76	-0.36	0.65	1.40	1.50
Z7	-1.60	-1.25	1.52	0.47	1.36
Z8	2.81	-2.93	-1.08	0.36	1.96
Z9	2.16	-0.31	0.85	-1.04	2.77
Z10	1.66	4.22	-1.16	1.36	3.87
Z11	2.16	-0.53	0.69	-1.80	2.59
Z12	2.78	0.42	1.55	-0.95	3.39
Z13	1.55	-0.07	0.02	0.68	2.64
Z14	2.01	0.36	2.38	1.68	3.53
Z15	2.43	-0.37	-0.62	0.03	2.68
Z16	-0.10	-4.38	-2.19	0.39	0.19
Z17	-0.84	1.19	-1.54	-1.07	1.63
Z18	-2.10	0.79	-2.10	-1.00	0.93
Z19	-0.85	1.40	-0.63	0.99	2.10
Z20	-2.42	-0.16	-0.29	-1.24	0.84
Z21	0.66	2.51	-0.44	-1.25	2.82

注: 表中数据均保留2位小数。

Notes: All data in the table are rounded to two decimal places.

## 2.4 樟树健康评价方法的建立

以校正后的F值作为最终评价标准, 得出的分数区间为[0.00, 4.00]。基于此, 本研究将樟树健康状态

划分为 4 个等级,建立了一种以生理指标为核心的樟树健康评价方法(表 10)。

表 10 樟树健康评价等级表  
Tab. 10 *C. officinarum* health evaluation grading table

	I 级	II 级	III 级	IV 级
<i>F</i> 值	0.00< <i>F</i> ≤1.50	1.50< <i>F</i> ≤2.00	2.00< <i>F</i> ≤4.00	<i>F</i> >4.00
<i>F</i> -score				
健康评价 Health evaluation	健康	亚健康	衰弱	濒危

注:表中数据均保留2位小数。

Notes: All data in the table are rounded to two decimal places.

依据 1.1 所述方法计算 HI 值,对 21 株樟树(含大树和古树)进行健康等级初步判断,结果为:正常 13 株、衰弱 8 株、濒危 0 株。采用本文建立的樟树健康评价体系判断,结果为:健康 8 株、亚健康 4 株、衰弱 9 株、濒危 0 株。与现有评价体系相比(表 11),同一植株健康等级判定一致(即现有体系“正常”对应本体系“健康/亚健康”、“衰弱”对应“衰弱”)的植株共 20 株,判定准确率达 95.24%。其中,完全一

致判定(现有体系“正常”对应本体系“健康”、“衰弱”对应“衰弱”)的植株 16 株,完全一致率达 76.19%;现有体系判定为“衰弱”(2.5<HI≤3.8)的植株,本体系误判为“健康”(0.00<*F*≤1.50)的数量为 0 株,健康误判率为 0%;现有体系判定为“正常”(3.8<HI≤5)的植株,本体系误判为“衰弱”(2.00<*F*≤4.00)的仅 1 株,衰弱误判率为 4.76%,该植株的 HI 值为 3.95,已接近现有体系“正常”等级的阈值下限。综上,本研究建立了一个基于生理生化检测指标的樟树健康评价方法,该方法能够客观、直接反映樟树个体健康状况。其中“亚健康”等级的增设,对于树木健康状态衰弱的早期发现和诊断具有一定意义,为树木的健康管理,特别是古树名木的科学养护等提供理论依据。

### 3 讨论

樟树是国家二级保护植物,具有重要的药用和人文价值。在自然和城市环境中生存的樟树时常会受到人类密集活动、极端气候等引发的环境条件改

表 11 樟树不同评价方法结果比对比表

Tab. 11 Comparison table of different *C. officinarum* evaluation methods

树木编号 Number	健康等级评价 Health evaluation grade			
	HI 值 HI value	等级 Grade	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	等级 Grade
Z1	4.21	正常	1.71	亚健康
Z2	4.93	正常	1.11	健康
Z3	4.51	正常	1.45	健康
Z4	4.85	正常	1.21	健康
Z5	4.66	正常	1.70	亚健康
Z6	4.58	正常	1.50	健康
Z7	4.85	正常	1.36	健康
Z8	3.94	正常	1.96	亚健康
Z9	3.53	衰弱	2.77	衰弱
Z10	3.25	衰弱	3.87	衰弱
Z11	3.58	衰弱	2.59	衰弱
Z12	3.11	衰弱	3.39	衰弱
Z13	3.95	正常	2.64	衰弱
Z14	3.58	衰弱	3.53	衰弱
Z15	3.47	衰弱	2.68	衰弱
Z16	3.93	正常	0.19	健康
Z17	4.21	正常	1.63	亚健康
Z18	4.04	正常	0.93	健康
Z19	3.37	衰弱	2.10	衰弱
Z20	3.99	正常	0.84	健康
Z21	3.38	衰弱	2.82	衰弱

注:参考DB4401/T 126—2021,正常 3.8<HI≤5,衰弱 2.5<HI≤3.8,濒危 0<HI≤2.5。

Notes: According to DB4401/T 126—2021, the classification is as follows: Normal 3.8 <HI ≤ 5; Weak 2.5 <HI ≤ 3.8; Endangered 0 <HI ≤ 2.5.

变和自身生长状态减弱等因素的影响(Raum et al., 2023)。运用合理的树木健康评价方法,有助于了解树木健康状态,进而制定相应的保护措施。因此,选定科学的、与树木状态紧密相关的健康指标来建立树木健康评价方法十分必要。相较于形态指标,生理生化指标在一定程度上能够更加客观、快速地表征树木在不同逆境胁迫下的健康状况和受害程度。例如,樟树和枫香 *Liquidambar formosana* Hance 受干旱胁迫后叶片含水率明显下降,MDA含量明显升高(裴云霞等, 2024; Wang et al., 2025); 苹果 *Malus domestica* (Suckow) Bbrkh. 受干旱胁迫后SOD活性和ABA浓度会上升,根系活力短暂下降后又快速上升(Davies and Zhang, 1991; 刘佩等, 2025); 在光照条件逐渐减弱时,树番茄 *Cyphomandra betacea* (Cav.) Sendtn. 叶片中N、P、K的含量显著增加,叶片含水率先升高后降低(李树萍等, 2023); 药用植物喜树 *Camptotheca acuminata* Decne. 通过增加可溶性糖、可溶性蛋白的含量来提高POD和CAT的活性以适应盐碱土胁迫(宋婷等, 2025); 随着光胁迫程度的增加,蒙古栎 *Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb. 幼苗LT、UET、PT明显下降,LEF先增加后降低(李金霞等, 2023)。

部分研究将生理生化指标纳入树木健康诊断的前期检测范围。例如,在国槐 *Styphnolobium japonicum* (L.) Schott 行道树健康评价研究中,邵鹏(2020)基于树冠体积、枝条健康率等外观指标进行主成分分析,构建了健康评价体系。为探究生理指标与国槐行道树健康状态间的关系,检测了叶片的相对叶绿素含量、含水量、氮、磷、钾等生理指标,但由于多数生理指标仅在亚健康树木与不健康树木间有显著差异,与健康树木无明显差异,最终未将这些生理指标纳入评价体系。郑华英等(2023)选择叶绿素含量、SOD、谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione peroxidase, GSH-Px)、POD、CAT及部分外观指标对银杏 *Ginkgo biloba* L.、榉树 *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino 和朴树 *Celtis sinensis* Pers. 等古树进行检测,筛选核心指标建立古树健康评价方法,但由于样本数量少等原因,多数生理生化指标检测结果在正常株与衰弱株间无显著差别。池敏杰等(2010)对鼓浪屿古榕树 *Ficus microcarpa* L. f. 进行健康诊断时加入了叶绿素这一生理指标,但因生理指标数量过少,无法代表树木整体的生理状况变化,导致诊断结果的可信度低。

综合前人研究,本研究尝试建立了一种涵盖物质含量、植物激素、酶类活力、组织结构、元素含量

等多种生理生化指标在内的健康评价方法,以实现树木健康状态的早期诊断和客观评价。其中,许多指标的检测结果与前人研究一致。例如,香樟树苗MDA含量随衰弱程度加剧而显著增加,SOD活性在亚健康状态下明显上升,这与Wang等(2025)的研究结论一致;树木逐渐衰弱时ABA浓度上升,这与Davies and Zhang(1991)及刘佩等(2025)的研究结果一致。然而,也存在部分差异。例如,本文在室外采样实验中未检测总酚、根系活力、SOD和IAA等4个指标,但其在部分研究中具有重要意义。例如,张梦飞等(2022)探究绿化树种抗旱性时发现,随着干旱胁迫程度的加剧,栎树 *Koelreuteria paniculata* Laxm.、楸树 *Catalpa bungei* C. A. Mey. 的SOD活性先显著上升后显著下降;曾光辉等(2016)发现自然低温胁迫使茶树 *Camellia sinensis* (L.) Kuntze 叶片IAA含量出现显著变化等。此外,植物体内营养元素含量会随土壤性质、光照、水肥状态等多种环境因素的变化而呈现显著差异。尽管部分元素在室内模拟不同健康状态的试验中表现出显著变化,但在室外检测中其含量波动较大,因此本研究未将10种营养元素纳入普适性评价指标体系,也未用于后续健康评价。但需强调的是,营养元素对植物生长发育至关重要。

本研究最终筛选获得的13个关键生理生化指标,从树木的胁迫响应、组织健康、代谢状况、物质动态调节与信号转导等方面综合评价樟树健康状况。指标数量适中,便于检测,可以更客观直接地反映树木生理状态,识别准确、误判率低,特别是对“亚健康”状态的判断,能够更及时地发现早期衰弱个体,方便更早采取针对性的复壮措施,特别适用于古树名木的健康监测和科学养护。与仅以树木表观性状指标为主的层次分析法和综合评级法相比,本方法减少了冗余信息,提高了数据计算效率,能够更加客观、直接地评价樟树个体健康状况;与以表观指标为主、个别生理指标为辅的健康诊断相比,本方法中选取的生理指标更具系统性与全面性,准确性和可信度均有大幅提升。本研究仍存在一定的不足之处,例如,室外采集的樟树样本量相对有限;尽管具有一定代表性,但可能会导致研究结果的泛化能力不足,影响体系的稳定性。在后续的研究应用中,需进一步增加样本量,优化校正评价方法,以提高该方法的普适性,为该评价方法在森林生态系统保护、古树名木精准管护等领域的广泛推广应用,奠定坚实的理论支撑与技术参考。

## 4 结论

现有树木健康评价方法主要依赖表观性状指标的观测预评估, 缺少对生理生化指标的检测和应用。本研究采用室内盆栽实验和室外采样检测相结合的研究方法, 通过相关性分析和主成分分析, 建立了一套基于树木生理生化指标的樟树健康状态评价方法, 并通过与现有健康评价方法比对验证, 证实了其准确性和可行性。该研究整合、筛选了树木健康状态评价中的生理生化指标, 能够更直接、客观地反映树木内在生理状态, 为树木早期衰弱的精准识别提供了关键技术支撑, 对丰富和完善树木健康评价理论体系具有重要实践价值。该方法仍需继续丰富室外样本数量, 不断提升实际应用性能, 以期为林木的健康管理和高效防护奠定基础, 为古树名木的早衰诊断和科学养护提供依据。

## 参 考 文 献

- 陈文静, 曹雨秋, 张慧会, 等. 2022. 法桐行道树生长健康评价——以南京市热河路为例[J]. *中南林业科技大学学报*, 42(8): 176–190, 201.
- Chen W J, Cao Q Y, Zhang H H, *et al.* 2022. Growth health evaluation of *Platanus acerifolia*: a case study of Rehe road in Nanjing[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 42(8): 176–190, 201. (in Chinese)
- 陈文静, 圣倩倩, 张慧会, 等. 2023. 南京市老城区法桐行道树健康状况研究[J]. *西北林学院学报*, 38(3): 251–258.
- Chen W J, Sheng Q Q, Zhang H H, *et al.* 2023. Structure and health status of *Platanus acerifolia* street trees in old district of Nanjing[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 38(3): 251–258. (in Chinese)
- 池敏杰, 刘海桑, 游思洋, 等. 2010. 古榕树健康诊断初探[J]. *亚热带植物科学*, 39(3): 21–23.
- Chi M J, Liu H S, You S Y, *et al.* 2010. The diagnosis of the ancient trees of *Ficus microcarpa*[J]. *Subtropical Plant Science*, 39(3): 21–23. (in Chinese)
- 崔钰涵. 2025. 樟树育苗技术综述[J]. *现代园艺*, 48(10): 58–60.
- Cui Y H. 2025. A review of *Cinnamomum camphora* seedling cultivation techniques[J]. *Contemporary Horticulture*, 48(10): 58–60. (in Chinese)
- 冯发玉, 练东明, 余英, 等. 2024. 基于综合评分法的油樟优树选择研究[J]. *中国野生植物资源*, 43(12): 75–80.
- Feng F Y, Lian D M, Yu Y, *et al.* 2024. Study on the selection of superior trees for *Cinnamomum longepaniculatum* based on comprehensive scoring method[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 43(12): 75–80. (in Chinese)
- 郭文婷, 梁晶, 杨瑞卿, 等. 2025. “生长-管护-环境”协同视角下的上海市行道树健康评价[J]. *中南林业科技大学学报*, 45(5): 185–197.
- Guo W T, Liang J, Yang R Q, *et al.* 2025. Analysis of street tree health impact factors from the collaborative perspective of "growth-management-environment" in Shanghai[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 45(5): 185–197. (in Chinese)
- 侯孟月, 王菲, 陈铭, 等. 2023. 千家寨野生型茶树与栽培型茶树叶片解剖结构及生理特性[J]. *生态学杂志*, 42(5): 1074–1082.
- Hou M Y, Wang F, Chen M, *et al.* 2023. Leaf anatomical structure and physiological characteristics of wild and cultivated tea trees in Qianjiazhai[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 42(5): 1074–1082. (in Chinese)
- 李金霞, 孟祥嵩, 杨新兵, 等. 2023. 光胁迫对蒙古栎幼苗叶片结构和生理的影响[J]. *西部林业科学*, 52(1): 51–56.
- Li J X, Meng X S, Yang X B, *et al.* 2023. Effects of light stress on leaf structure and physiology of *Quercus mongolica* seedlings[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 52(1): 51–56. (in Chinese)
- 李琳. 2020. 古树健康监测与评价研究进展[J]. *现代农业科技* (10): 103–105.
- Li L. 2020. Research progress on health monitoring and evaluation of ancient trees[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, (10): 103–105. (in Chinese)
- 李树萍, 董琼, 李世民, 等. 2023. 遮阳对树番茄幼苗叶片性状及化学计量特征的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 49(2): 183–189.
- Li S P, Dong Q, Li S M, *et al.* 2023. Effects of shading on leaf traits and stoichiometric characteristics of *Cyphomandra betacea* seedlings[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 49(2): 183–189. (in Chinese)
- 刘光金, 贾宏炎, 卢立华, 等. 2014. 不同林龄红椎人工林优树选择技术[J]. *东北林业大学学报*, 42(5): 9–12.
- Liu G J, Jia H Y, Lu L H, *et al.* 2014. Selective criterion for superior tree of *Castanopsis hystrix*[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 42(5): 9–12. (in Chinese)
- 刘佩, 黄耀龙, 李国梁. 2025. 苹果对干旱胁迫响应的研究进展[J]. *寒旱农业科学*, 4(2): 105–112.
- Liu P, Huang Y L, Li G L. 2025. Research progress on the response of apples to drought stress[J]. *Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences*, 4(2): 105–112. (in Chinese)
- 裴云霞, 戴涉鸿, 唐潇潇, 等. 2024. 枫香树幼苗对干旱与淹水胁迫的适应性研究[J]. *湖北民族大学学报(自然科学版)*, 42(4): 573–581.
- Pei Y X, Dai M H, Tang X X, *et al.* 2024. Research on adaptation of *Liquidambar formosana* hance. seedlings to drought and waterlogging stress[J]. *Journal of Hubei Minzu University (Natural Science Edition)*, 42(4): 573–581. (in Chinese)
- 邵鹏. 2020. 北京城市核心区国槐行道树健康评价研究[D]. 北京: 北京林业大学.
- Shao P. 2020. Study on health assessment of *Sophora japonica* in Beijing urban core area[D]. Beijing: Beijing Forestry University. (in Chinese)
- 宋婷, 穆贤, 李芙蓉, 等. 2025. 盐碱土对喜树生长和喜树碱合成的影响[J/OL]. *分子植物育种*: 1–9. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20250901.1543.002>.
- Song T, Mu X, Li F R, *et al.* 2025. Effects of saline-alkaline soil on *Camptotheca acuminata* growth and camptothecin synthesis[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*: 1–9. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20250901.1543.002>. (in Chinese)
- 涂白连, 江斌, 伍艳芳, 等. 2025. 樟树含油率近红外光谱测定模型[J]. *东北林业大学学报*, 53(7): 118–123.
- Tu B L, Jiang B, Wu Y F, *et al.* 2025. Near-infrared spectroscopy determination model for the oil content of *Cinnamomum camphora*[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 53(7): 118–123. (in Chinese)
- 王彩艳, 潘占兵, 左忠, 等. 2025. 5种金银花叶片解剖结构特征及其抗旱

- 性研究[J]. 中国农学通报, 41(16): 68–74.
- Wang C Y, Pan Z B, Zuo Z, *et al.* 2025. Study on anatomical structure characteristics and drought resistance of five species of *Lonicera japonica* leaves[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 41(16): 68–74. (in Chinese)
- 文超, 王春红, 黄珺, 等. 2023. 济南市行道树现状调查及优化策略[J]. 现代园艺, 46(16): 15–18, 23.
- Wen C, Wang C H, Huang J, *et al.* 2023. Survey on the current status of street Trees in Jinan city and optimization strategies. Contemporary Horticulture, 46(16): 15–18, 23. (in Chinese)
- 翁殊斐, 黎彩敏, 庞瑞君. 2009. 用层次分析法构建园林树木健康评价体系[J]. 西北林学院学报, 24(1): 177–181.
- Weng S F, Li C M, Pang R J. 2009. Establishment of landscaping tree health assessment model using analytic hierarchy process[J]. Journal of Northwest Forestry University, 24(1): 177–181. (in Chinese)
- 杨嫒, 田明华, 秦国伟, 等. 2019. 城市古树名木综合价值货币化评估研究——以北京市古树“遮荫侯”为例[J]. 干旱区资源与环境, 33(6): 185–191.
- Yang Y, Tian M H, Qin G W, *et al.* 2019. Monetization evaluation on the comprehensive value of old and valuable trees in cities—a case study of "Marguis of Shade" in Beijing[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 33(6): 185–191. (in Chinese)
- 游惠明, 游秀花, 陈笑玲, 等. 2009. 福州市行道树种综合评价与分级选择[J]. 中国城市林业, 7(1): 15–17.
- You H M, You X H, Chen X L, *et al.* 2009. Integrated evaluation and selection of street tree species in Fuzhou city[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 7(1): 15–17. (in Chinese)
- 袁菲, 张星耀, 梁军. 2012. 基于有害干扰的森林生态系统健康评价指标体系的构建[J]. 生态学报, 32(3): 964–973.
- Yuan F, Zhang X Y, Liang J. 2012. Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the harmful disturbance[J]. Acta Ecologica Sinica, 32(3): 964–973. (in Chinese)
- 曾光辉, 马青平, 王伟东, 等. 2016. 自然低温对茶树内源激素含量的影响[J]. 茶叶科学, 36(1): 85–91.
- Zeng G H, Ma Q P, Wang W D, *et al.* 2016. Effect of natural low-temperature on endogenous hormones of *Camellia sinensis* (L.) kuntze plant[J]. Journal of Tea Science, 36(1): 85–91. (in Chinese)
- 张梦飞, 李爽, 李运盛, 等. 2022. 9种绿化树种幼苗抗旱性评价[J]. 中国农学通报, 38(20): 38–46.
- Zhang M F, Li S, Li Y S, *et al.* 2022. Evaluation on the drought resistance of seedlings of nine greening tree species[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 38(20): 38–46. (in Chinese)
- 赵丹阳, 秦长生, 廖仿炎, 等. 2016. 广东省樟树有害生物调查及主要种类危害特点[J]. 中国森林病虫, 35(6): 21–26.
- Zhao D Y, Qin C S, Liao F Y, *et al.* 2016. Species and damage of pests on *Cinnamomum camphora* in Guangdong province[J]. Forest Pest and Disease, 35(6): 21–26. (in Chinese)
- 赵小亮, 周国娜, 高宝嘉, 等. 2008. 主成分分析法在承德县森林生态系统健康评价中的应用[J]. 中国农学通报, 24(6): 400–403.
- Zhao X L, Zhou G N, Gao B J, *et al.* 2008. The principal component analysis method in health evaluation for forest ecosystem of Chengde County[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 24(6): 400–403. (in Chinese)
- 郑华英, 刘云鹏, 解春霞, 等. 2023. 江苏地区古树健康评价体系构建研究[J]. 江苏林业科技, 50(5): 17–23, 52.
- Zheng H Y, Liu Y P, Xie C X, *et al.* 2023. Study on the construction of health evaluation system for ancient trees in Jiangsu Province[J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology, 50(5): 17–23, 52. (in Chinese)
- Bertolin C, Caratelli A, Grimaldi M, *et al.* 2021. Analysis of Jerk as a novel tree-falls hazard index: A case study applied to tree monitoring in the archaeological park of the Colosseum in Rome (Italy)[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 56: 102122.
- Camargo S B, Simões L O, de Azevedo Medeiros C F, *et al.* 2018. Antihypertensive potential of linalool and linalool complexed with  $\beta$ -cyclodextrin: Effects of subchronic treatment on blood pressure and vascular reactivity[J]. Biochemical Pharmacology, 151: 38–46.
- Chen C, Zhang C C, Li S Y, *et al.* 2021. Biological traits and life history of *Pagiophloeus tsushimanus* (Coleoptera: Curculionidae), a weevil pest on camphor trees in China[J]. Journal of Forestry Research, 32(5): 1979–1988.
- Davies W J, Zhang J. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 42: 55–76.
- Duan Y F, Li M, Yi X G, *et al.* 2015. Assessment of genetic diversity among androdioecious ancient *Osmanthus fragrans* trees by SSR markers[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 61: 179–185.
- Erre P, Chessa I, Muñoz-Diez C, *et al.* 2010. Genetic diversity and relationships between wild and cultivated olives (*Olea europaea* L.) in Sardinia as assessed by SSR markers[J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 57(1): 41–54.
- Fu M, Liang R H, Wang P F, *et al.* 2025. Evaluation and selection of superior *Fraxinus mandshurica* families for genetic improvement using growth traits, morphological characteristics, and wood properties[J]. Euphytica, 221(6): 86.
- Hickman G W, Perry E, Evans R. 1995. Validation of a tree failure evaluation system[J]. Arboriculture & Urban Forestry, 21(5): 233–234.
- Liu J T, Yu Z X, Li X H, *et al.* 2025. Tree selection of *Vernicia montana* in a representative orchard cluster within southern Hunan Province, China: A comprehensive evaluation approach[J]. Plants, 14(15): 2351.
- Luo Y M, Luo Y D, Chen F Y, *et al.* 2014. Studies on the chemical constituents in the essential oil from the leaves of *Cinnamomum bodinieri* levl[J]. Advanced Materials Research, 1015: 373–376.
- Raum S, Collins C M, Urquhart J, *et al.* 2023. Tree insect pests and pathogens: A global systematic review of their impacts in urban areas[J]. Urban Ecosystems, 26(2): 587–604.
- Stravinskienė V, Bartkevičius E, Abraitienė J, *et al.* 2018. Assessment of *Pinus sylvestris* L. tree health in urban forests at highway sides in Lithuania[J]. Global Ecology and Conservation, 16: e00517.
- Wang R J, Qin X X, Pan H B, *et al.* 2025. Assessing the effects of drought stress on photosynthetic performance and physiological resistance in camphor seedling leaves[J]. PLoS One, 20(1): e0313316.
- Weatherley P E. 1950. Studies in the water relations of the cotton plant[J]. New Phytologist, 49(1): 81–97.