

楠木古树健康评价模型的构建及应用*

谭夏阳¹ 薛彦斌² 钟叶³ 丁博³ 王茜³

(1. 石柱土家族自治县国有林场, 重庆 409100; 2. 重庆工业职业技术学院, 重庆 401120;
3. 西南大学生命科学学院, 重庆 400715)

摘要 为了给楠木 *Phoebe zhennan* 古树的保护提供指导依据, 文章利用抽样方法调查了重庆市大足区、潼南区、酉阳县及武隆区集中分布的90株100~500 a的楠木古树, 并运用结构方程模型法 (Structural equation modeling, SEM) 构建楠木古树健康评价模型。结果表明, (1) 通过构建理论模型、模型假设、数据信度和效度检验、模型适配度检验以及模型修正, 获得了适配度较高的评价模型, 可应用于实际调查和检测。(2) 在14项评价指标中, 下端枯枝 (0.097 6)、顶梢枯死 (0.097 2) 和叶密度 (0.096 0) 所占的权重较高, 是模型中反映楠木古树健康的关键指标。(3) 使用修正后的评价模型对90株楠木古树进行健康评价, 发现“健康”单株占比最高 (64.44%), “一般”次之 (28.89%), “较差和濒死 (或死亡)”在模型中占比6.66%, 需对其开展抢救性保护。

关键词 楠木古树; 健康评价模型; 结构方程模型; 古树保护

中图分类号: S718.4 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2025) 02-0051-09

DOI: 10.20221/j.cnki.2096-2053.202502007

Construction and Application of the Health Evaluation Model of Ancient *Phoebe zhennan*

TAN Xiayang¹ XUE Yanbin² ZHONG Ye³ DING Bo³ WANG Qian³

(1. Shizhu Tujia Autonomous County State-Owned Forest Farm, Chongqing, 409100, China; 2. Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing, 401120, China; 3. School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing, 400715, China)

Abstract To provide a scientific basis for the conservation of ancient *Phoebe zhennan*, this study investigated 90 ancient *P. zhennan* aged 100–500 years distributed in Dazu district, Tongnan district, Youyang county and Wulong district of Chongqing Municipality, and constructed a model for assessing the health status of ancient *P. zhennan* using structural equation modeling (SEM). The results of the study showed that: (1) Through the construction of theoretical models, model assumptions, data reliability and validity tests, model fitness tests, and model refinement, a highly fitting evaluation model was obtained, which can be applied to actual surveys and detection. (2) Among the evaluation indexes, lower branch dieback (0.097 6), apical shoot dieback (0.097 2), and leaf density (0.096 0) exhibited the highest weights, among the evaluation indexes, which were the key indexes to reflect the health of trees in the model. (3) The modified evaluation model was used to evaluate the health status of 90 ancient *P. zhennan*. It was found that the proportion of 'healthy' individu-

* 基金项目: 长江上游 (重庆段) 国家重点野生濒危植物保护研究 (zlg2021-cq20211210), 桢楠良种繁育与高效培育技术推广示范 (渝林科推 2022 年 8 号)。

第一作者: 谭夏阳 (1978—), 男, 高级工程师, 主要从事林木资源繁育与管理等工作。E-mail: 648477002@qq.com

通信作者: 王茜 (1987—), 女, 副教授, 主要从事植物进化分类与保护生物学等研究工作。E-mail: wangqian123@swu.edu.cn

al trees was the highest (64.44%), followed by 'general' (28.89%), and 'poor and dying (or dying)' accounted for 6.66% in the model. It is necessary to carry out rescue protection.

Key words ancient *Phoebe zhennan*; health evaluation model; SEM; protection of old trees

古树指树龄在 100 a 以上的树木^[1], 是自然界和前人留下来的珍贵遗产, 具有重要的科学价值、文化价值、历史价值和美学价值, 在自然生态与人类文明里都扮演着不可替代的重要角色^[2]。由于古树树龄大, 受树木自身特性所限, 生长势日趋衰弱, 易遭受不利自然因素的影响, 会存在倾斜、枝梢枯死、病虫害等问题^[3], 因此积极开展古树保护尤为重要, 其中古树健康诊断及护理是开展古树保护的一项重点工作^[4]。要推进古树的健康诊断和护理, 则需要及时准确地评估古树健康状况, 这对于古树管护措施的制定和传统文化的延续至关重要。

为了能更科学地对古树健康状况进行评价, 许多学者开展了树木健康评价模型的相关研究。现有研究大多采用指标赋权法构建古树健康评价模型^[5]。该方法通过多指标归类, 并以对权重赋值的方式对古树健康做出综合而全面的评价^[6], 分为主观赋权法^[7-8]、客观赋权法^[9]、主客观相结合赋权法^[10]。其中, 主观赋权法是较为主流的方法, 而层次分析法是应用最为广泛的一种主观赋权法^[11]。如翁殊斐^[8]等人选择树木整体状况、树冠、树干、树根 4 个方面, 共 14 个指标, 采用层次分析法构建了园林树木健康评价体系, 他们研究发现, 生长势、树干状况和倾斜状况是判断树木健康最重要的 3 个因素, 这与 Gary 等^[12]国外学者的研究结果相似。虽然层次分析法是最常见的古树健康评价方法, 但存在只突出指标间的差异并忽略指标间关联性和多重共线性问题。近年, 王清麒^[3]等人创新性提出用结构方程模型构建国槐 *Styphnolobium japonicum* 古树的 健康评价模型, 改善了指标赋权法中存在的一些弊端, 为古树健康评价提供了新思路。

本文选取重庆市大足区、潼南区、酉阳县、武隆区共 4 个区域分布的 90 株楠木 *Phoebe zhennan* 古树作为研究对象, 基于监测数据探究影响楠木古树健康状况的因素, 运用结构方程模型法 (Structural equation modeling, SEM) 构建楠木古树健康评价模型并进行健康评价, 以期更好地制定和调整保护古树的计划和政策, 改善与之相适

应的楠木古树养护措施, 使楠木古树发挥最大的生态与社会价值。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

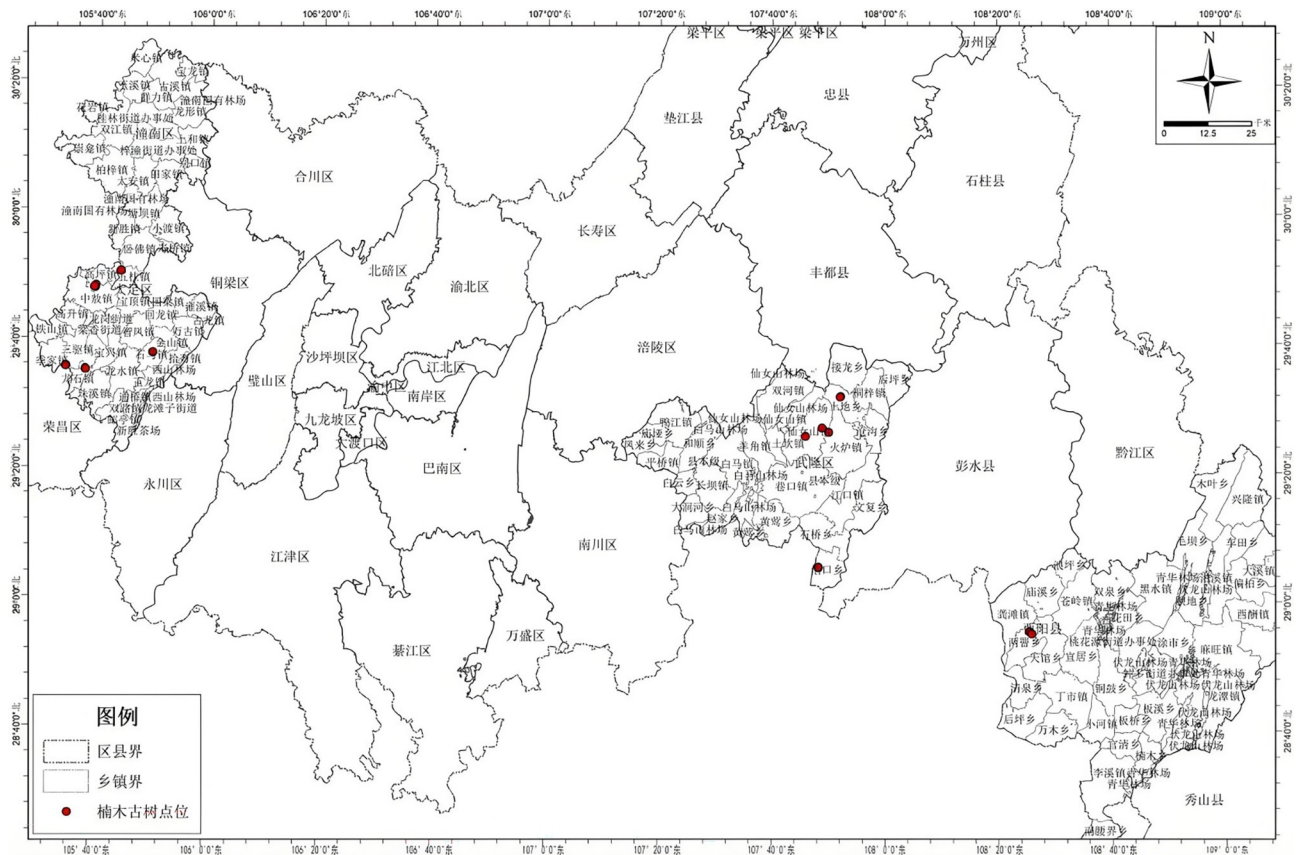
重庆市位于中国内陆西南部、长江上游地区, 地貌以丘陵、山地为主。重庆属于亚热带季风性湿润气候, 年平均气温 18 °C 左右, 年降雨量常年在 1 000~1 400 mm^[13]。重庆分布有较为丰富的楠木古树资源。由于楠木本身的繁殖特性与重庆特殊的地形, 楠木古树在重庆地区的分布方式主要为集群分布, 少数为散生木^[14]。

1.2 研究方法

1.2.1 数据采集 基于 2022 年重庆市林业科学研究院提供的古树名木普查资料, 在重庆市楠木古树集中分布的大足区、潼南区、酉阳县、武隆区选取 90 株作为研究对象, 其分布如图 1。实地调查采集楠木古树的 健康指标数据。

2022 年 5—6 月使用软尺等工具测量并记录楠木古树的胸径, 估测高度、冠幅; 目测观察每株楠木古树的生长势、冠形、病虫害、生长空间、大枝枯损、下端枯枝、叶形、叶色等, 并采用文字描述和相机拍摄进行详细记录; 使用手机软件量角器测量仪 (版本 3.2) 测定倾斜程度; 观测顶梢枝条生长, 确定并记录顶梢枯死量 (顶端枯死的枝梢长度与冠长的比例); 使用叶面积指数仪测定叶密度; 测量并记录树皮枯死程度 (树皮枯死或脱落的最大长度与其周长的比例); 通过观察以及询问当地居民等方式了解并记录当地楠木是否遭受偷伐盗砍等人为影响破坏, 并记录其受影响程度等; 测量树干外部空洞的最大宽度; 使用木槌敲击树干, 通过声音反映树干的空腐程度^[15]。

1.2.2 评价指标选取 古树健康受内外因素 (自然因素、人为因素) 的综合影响, 形态学评价与健康综合评价具有较好的一致性, 能够应用于古树名木的健康评价^[16]。按照树木结构和外部形态将指标分成整体状况、枝梢状况、叶部状况和树干状况 4 个方面^[3]。整体状况包括生长势、冠形、倾斜程度、病虫害和环境影响; 枝梢状况包括大



注：大足区 53 株；潼南区 12 株；酉阳县 9 株；武隆区 16 株

图 1 重庆市调查区楠木古树分布

Figure 1 The distribution of ancient *Phoebe zhennan* in Chongqing

枝枯损、顶梢枯死和下端枯枝；叶部状况包括叶密度、叶形、叶色；树干状况包括树皮枯死、外部空洞、内部空腐。

其中，生长势是古树树体营养水平、生长状况的外观总体表现，受树龄、负载量、环境条件等因素的影响，一般而言，生长势随树龄增加而减弱^[8]；冠形是树冠的整体形状，以圆润饱满为佳^[17]；倾斜程度受到光照均匀情况、风力或人为作用等因素的影响，通常情况下，根系健康、与土壤的联系紧密的树体一般不易倾斜，因此倾斜程度可反映古树的稳定性；病虫害指古树枝叶上受到病菌或虫害侵染的状况^[18]，白蚁是楠木古树的主要虫害；环境影响指建筑物或邻木等的遮挡以及道路、生活垃圾等人为干扰对古树生存土壤、生长空间的影响状况，或古树遭受偷伐盗砍等人为影响破坏，反映古树受外部干扰的程度。大枝枯损是指人为或自然因素造成的主枝伤害；顶梢枯死是指树冠顶部嫩枝的枯死比例；下端枯枝指下部冠层嫩枝死亡情况，这三者能够良好指示树

木自身衰老与健康程度。叶密度是指古树叶片分布的浓密情况；叶形是指古树叶片的形状，正常叶形为椭圆形，少为披针形或倒披针形；叶色反映古树叶部的健康状况，正常叶色为深绿，有的古树因营养不良或其他因素叶片泛黄或叶尖部位发黑，叶密度、叶形、叶色能够综合反映古树叶部进行光合作用的能力与强度。树皮枯死、外部空洞、内部空腐^[18]等问题会影响树木地上部与地下部之间营养成分的运输和供给，从而影响古树的生长和健康状况。

1.2.3 评价指标赋值 在对重庆市楠木古树进行野外调查和初步分析的基础上，参考苏纯兰等^[19]的研究，将 14 个评价指标分为 5 级，并规定不同等级指标的相应范围，对指标进行赋值。指标状况良好赋值为 0，指标状况最差赋值为 4（表 1）。

1.2.4 权重系数确定 结构方程模型由测量模型（式（1）、（2））和结构模型（式（3））两个部分组成。模型中的变量分为观测变量（显性变量）和潜在变量。

表 1 楠木古树健康评价指标赋值标准

Table 1 Health evaluation index assignment standard of ancient *Phoebe zhennan*

评价指标	指标赋值标准				
	0	1	2	3	4
生长势	生长旺盛, 高大繁密, 无任何不良状况	生长较为旺盛, 较为高大茂密, 局部生长状况受到影响	生长状态较差, 生长势衰弱比较明显	生长状态极差, 非常衰弱	全株干枯, 濒临死亡
冠形	冠形圆润饱满	近自然冠形	冠形微缺, 缺口部分 $\leq 10\%$	树冠缺损, 缺损部分大于 10%, 不超过 40%	树冠缺损, 缺损部分 $>40\%$
倾斜程度	$\leq 5^\circ$	($5^\circ, 10^\circ$]	($10^\circ, 20^\circ$]	($20^\circ, 30^\circ$]	$>30^\circ$
病虫害	被害 5% 以下	被害 [5%~25%)	被害 [25%~50%)	被害 [50%~75%)	被害 75% 及以上
环境影响	周围无杂物堆积, 无任何生活垃圾等人为干扰	周围有少量杂物或生活垃圾堆积, 局部有少量建筑遮阴或其他人为干扰	周围有较多杂物或生活垃圾堆积, 建筑遮阴或其他人为干扰较大	周围有大量杂物或生活垃圾堆积, 建筑遮阴或其他人为干扰严重	完全被建筑物或道路干扰, 周围堆积物异常严重, 其他人为干扰异常严重
大枝枯损	无枯损	折断枯枝占比 (0%~10%)	折断枯枝占比 [10%~50%)	折断枯枝占比 [50%~75%)	无健全大枝, 折断枯枝占比 75% 及以上
顶梢枯死	枯死量 $\leq 5\%$	枯死量 (5%, 25%]	枯死量 (25%, 50%]	枯死量 (50%, 75%]	枯死量 $>75\%$
下端枯枝	枯损量 $\leq 5\%$	枯损量 (5%, 25%]	枯损量 (25%, 50%]	枯损量 (50%, 75%]	枯损量 $>75\%$
叶密度	浓密 [85%~100%)	比较浓密 [75%~85%)	稀疏 [55%~75%)	很稀疏 [35%~55%)	极为稀疏 (<35%)
叶形	叶形正常	叶形变异叶片占比 (0%~10%)	叶形变异叶片占比 [10%~50%)	叶形变异叶片占比 [50%~75%)	叶形变异叶片占比 75% 及以上
叶色	整体正常绿色	叶色异常叶片占比 (0%~10%)	叶色异常叶片占比 [10%~50%)	叶色异常叶片占比 [50%~75%)	叶色异常叶片占比 75% 及以上
树皮枯死	无枯死或脱落	$\leq 1/8$ 树干周长	$\leq 1/3$ 树干周长	$\leq 1/2$ 树干周长	$>1/2$ 树干周长
外部空洞	无空洞	$\leq 1/8$ 树干周长	$\leq 1/3$ 树干周长	$\leq 1/2$ 树干周长	$>1/2$ 树干周长
内部空腐	$\leq 5\%$	(5%, 15%]	(15%, 30%]	(30%, 50%]	$>50\%$

$$X = \Lambda_X \xi + \delta \quad (1)$$

$$Y = \Lambda_Y \eta + \varepsilon \quad (2)$$

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta \quad (3)$$

其中, X 、 Y 分别为外生显性变量向量和内生显性变量向量; Λ_X 、 Λ_Y 分别为 X 在 ξ 上、 Y 在 η 上的因子负荷矩; δ 和 ε 分别为 X 、 Y 的误差项; ξ 、 η 分别为外生潜在变量和内生潜在变量; B 为内生潜变量 (η) 之间的路径系数, 反映一个内生潜变量对另一个内生潜变量的直接效应, 数值为正代表正向影响, 数值为负代表负向影响; Γ 表示外生潜变量 (ξ) 对内生潜变量 (η) 的路径系数, 反映外生变量的预测作用, 数值为正代表外生变量对内生变量有正向促进作用, 数值为负代表外生变量对内生变量有负向促进作用; ζ 为结构模型的残差项。

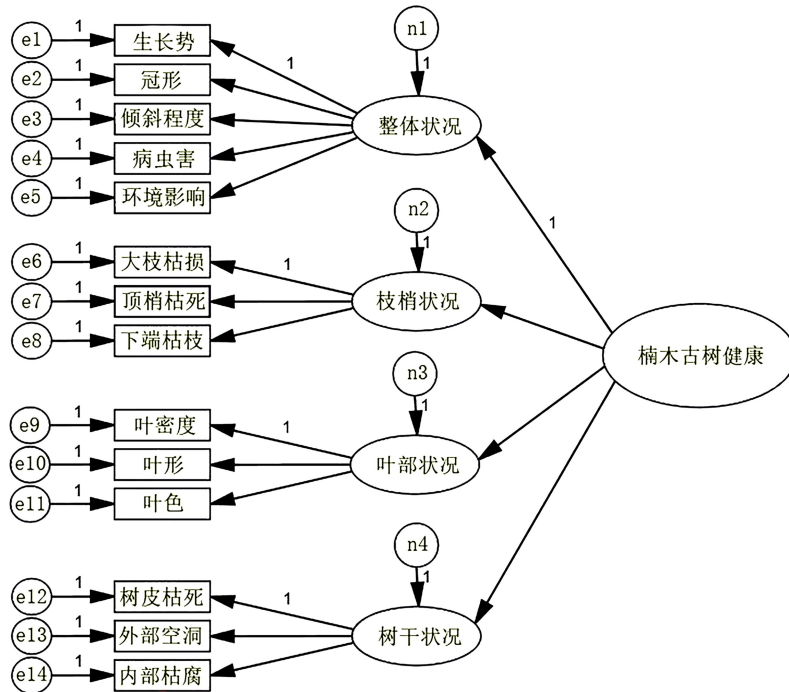
结构方程建模法包括 6 个步骤 (构建理论模型、模型假设、数据信度和效度检验、模型适配度检验、模型修正)。使用 IBM SPSS Amos 26

Graphics、IBM SPSS Statistics 24 等软件进行数据处理与分析, 进行楠木古树健康评价模型的构建。

以整体状况、枝梢状况、叶部状况和树干状况 4 个大指标为外生潜在变量, 以其对应的 14 项小指标作为观测变量建立楠木古树健康评价的理论模型 (图 2)。确定 4 个变量对楠木古树健康的标准化路径系数, 将标准化路径系数经归一化处理, 计算出各评价指标的权重系数。

基于现有古树健康评价的研究基础, 结合楠木古树自身生长规律做出合乎实际的假设 (表 2)。

数据信度采用克隆巴赫 (Cronbach's Alpha) 系数进行检验。当克隆巴赫系数 >0.6 时, 认为观测变量间一致性符合要求, 可进行继续分析; 数据效度以 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 与巴特利特球体检验来判断。当 KMO >0.6 , 以及巴特利特球体检验的 X^2 统计值的显著性概率, 即 P 值 <0.05 时, 表明数据适合进行因子分析^[19]。以上系数均运用 IBM SPSS Statistics 24 计算^[21]。



注：e 为残差，表示模型中未能通过观测变量、潜变量或路径所解释的部分。

图 2 楠木古树健康评价理论模型

Figure 2 Theoretical model of health evaluation of ancient *Phoebe zhennan*

表 2 楠木古树健康评价模型假设

Table 2 Hypothesis of health evaluation model of ancient *Phoebe zhennan*

假设编号	内容
H1	整体状况对楠木古树健康有显著正向影响
H2	枝梢状况对楠木古树健康有显著正向影响
H3	叶部状况对楠木古树健康有显著正向影响
H4	树干状况对楠木古树健康有显著正向影响

综合选取较为可靠的统计量作为检验整体模型适配度的指标，包括卡方自由度比 (X^2/df)、近似误差均方根 (RMSEA)、比较拟合指数 (Comparative fit index, CFI)、增值拟合指数 (Incremental fit index, IFI)、Tucker - Lewis 指数 (TLI)。通常情况下，当 $1 < X^2/df < 2$ ， $RMSEA < 0.1$ ，CFI、IFI、TLI 大于或接近 0.9 时表示模型适配^[22]。

依据 AMOS 输出报表中的修正指标提示，结合实际，考量模型理论基础与合理性对模型进行修正。模型修正后需要重新检验适配度，循环修正检验，使得最终模型更具理论基础与解释力。

1.2.5 健康值计算与健康等级规定 楠木古树健康程度 A 值的计算公式如下：

$$A = \sum_{i=1}^m C_i \times \omega_i \quad (4)$$

其中，A 代表健康值， C_i 代表第 i 项健康评价指标的得分值， ω_i 代表第 i 项健康评价指标的权重， m 代表指标总数。

楠木古树 A 值的满分为 4 分，根据 A 值将楠木古树健康状况分为 4 级，各级划分范围与对应的健康状况描述如表 3 所示。其中，楠木古树等级根据《古树名木鉴定规范》(LY/T 2737-2016) 进行分级^[23]。

2 结果与分析

2.1 楠木古树概况

重点调查大足区、潼南区、酉阳县和武隆区分布的楠木古树，合计 90 株；其中，一级古树 10 株，二级古树 22 株，三级古树 42 株 (表 4)。

大足区有二级古树 11 株，平均胸径为 63.4 cm，平均高度为 23.1 m；三级古树 42 株，平均胸径为 49.6 cm，平均高度为 19.0 m。潼南区有二级古树 11 株，平均胸径为 57.0 cm，平均高度为 18.1 m，一级古树 1 株，胸径为 77.0 cm，高度为 21 m；酉阳县有一级古树 9 株，平均胸径为 143.6 cm，平均高度为 28.8 m。武隆区有三级古树 15 株，平均

胸径为 127.6 cm, 平均高度为 25.2 m, 二级古树 1 株, 胸径为 109.0 cm, 高度为 30 m。

表 3 楠木古树健康评价等级描述

Table 3 Description of the health evaluation level of ancient *Phoebe zhennan*

健康等级	A 值	描述
健康	$0 \leq A < 1$	楠木古树整体生长势良好, 所受干扰影响较小, 树干、枝叶健康, 不存在或仅存在轻微问题, 不需要人为干预。
一般	$1 \leq A < 2$	楠木古树整体生长势较为良好, 受到一定的干扰或影响, 树干、枝叶少量枯损或受到轻微病虫害, 在人为干预下能够恢复健康。
较差	$2 \leq A < 3$	楠木古树整体生长势较差, 受到较为强烈的干扰或影响, 树干、枝叶枯损较严重或受到较为严重的病虫害, 在人为干预下很难恢复健康。
濒死 (或死亡)	$3 \leq A \leq 4$	楠木古树整体生长势极差, 受到的干扰或影响强烈, 枯损现象非常严重或受到非常严重的病虫害, 存在大量健康问题, 已经濒死 (或死亡)。

表 4 重庆市调查区各区县不同等级楠木古树分布

Table 4 Distribution of ancient *Phoebe zhennan* of different grades in each district and county of Chongqing

古树等级	年龄/a	大足区	潼南区	酉阳县	武隆区	总计
一级	500 以上	0	1	9	0	10
二级	300~500	11	11	0	1	23
三级	100~299	42	0	0	15	57
总计		53	12	9	16	90

2.2 权重系数确定

2.2.1 评价指标数据的信度和效度 数据的可靠性分析结果表明 (表 5), 除整体状况, 其余 3 个潜在变量的克隆巴赫系数均大于 0.6。根据整体状况的项总计统计结果 (表 6), 删除倾斜程度这一项后, 克隆巴赫系数为 0.631, 大于 0.6, 整体信度明显增加, 故应予以删除。

数据的因子分析结果表明 (表 7), 整体状况、枝梢状况、叶部状况、树干状况 4 个潜在变量的 KMO 均大于 0.6。且 4 个潜在变量的巴特利特球形度检验 P 值为 0.000, 大于 0.01, 通过了显著水平为 1% 的显著性检验, 说明数据适合进行因子分析。数据的信度和效度良好, 适于构建楠木古树健康评价模型。

表 5 调查指标数据的信度检验统计量

Table 5 Reliability test statistics of the evaluation index data

潜在变量	可测变量个数	克隆巴赫系数	修正后的克隆巴赫系数
整体状况	5	0.549	0.631
枝梢状况	3	0.767	0.767
叶部状况	3	0.713	0.713
树干状况	3	0.715	0.715

表 6 整体状况删除项后的信度检验统计量

Table 6 Reliability test statistic of the overall situation after removing the items

项名称	删除项后的标度平均值	删除项后的标度方差	修正后的项与总计相关性	删除项后的克隆巴赫系数
生长势	4.510	5.489	0.559	0.346
冠形	4.590	5.953	0.286	0.512
倾斜程度	5.670	8.022	0.011	0.631
病虫害	5.200	5.488	0.474	0.388
环境影响	4.080	6.297	0.270	0.518

2.2.2 评价模型适配度 由表 8 可知, 模型修正前 X^2/df 为 2.216, >2 , RMSEA 为 0.117, >0.1 , CFI、IFI、TLI 均 <0.9 , 不符合模型适配度检验要求。模型修正后, X^2/df 为 1.759, <2 , RMSEA

为 0.092, <0.1 , CFI、IFI 分别为 0.900、0.904, 均 >0.9 , TLI 为 0.867, 接近 0.9。表明修正后模型与观测数据的拟合较为适配。

表 7 调查指标数据的效度检验统计量

Table 7 Validity test statistics of the evaluation index data

潜在变量	可测变量个数	KMO	巴特利特球形度检验		
			近似卡方	自由度	显著性
整体状况	4	0.608	68.548	6	0.000
枝梢状况	3	0.673	70.549	3	0.000
叶部状况	3	0.669	52.161	3	0.000
树干状况	3	0.653	57.225	3	0.000

表 8 结构方程模型修正前后适配度评价指标结果

Table 8 Results of adaptation evaluation index before and after modification of SEM

项目	χ^2/df	RMSEA	CFI	IFI	TLI
模型修正前	2.216	0.117	0.826	0.831	0.788
模型修正后	1.759	0.092	0.900	0.904	0.867

2.2.3 模型修正以及指标权重值确定 修正后的模型路径图表明(图3)整体状况、枝梢状况、叶部状况和树干状况这4个潜在变量对楠木古树健康的标准化路径系数分别为0.783、0.975、0.935、0.723,满足潜在变量与古树健康间存在正向因果关系的模型假设。说明整体状况、枝梢状况、叶部状况和树干状况都是影响楠木古树健康的重要因素。

观测变量生长势、冠形、病虫害和环境影响在整体状况上的标准化路径系数分别为0.894、0.440、0.607、0.436;观测变量大枝枯损、顶梢枯死、下端枯枝在枝梢状况上的标准化路径系数为0.685、0.735、0.738;叶密度、叶形、叶色在叶部状况上的标准化路径系数为0.718、0.670、0.659;观测变量树皮枯死、外部空洞、内部空腐在树干状况上的标准化路径系数为0.704、0.676、0.858。

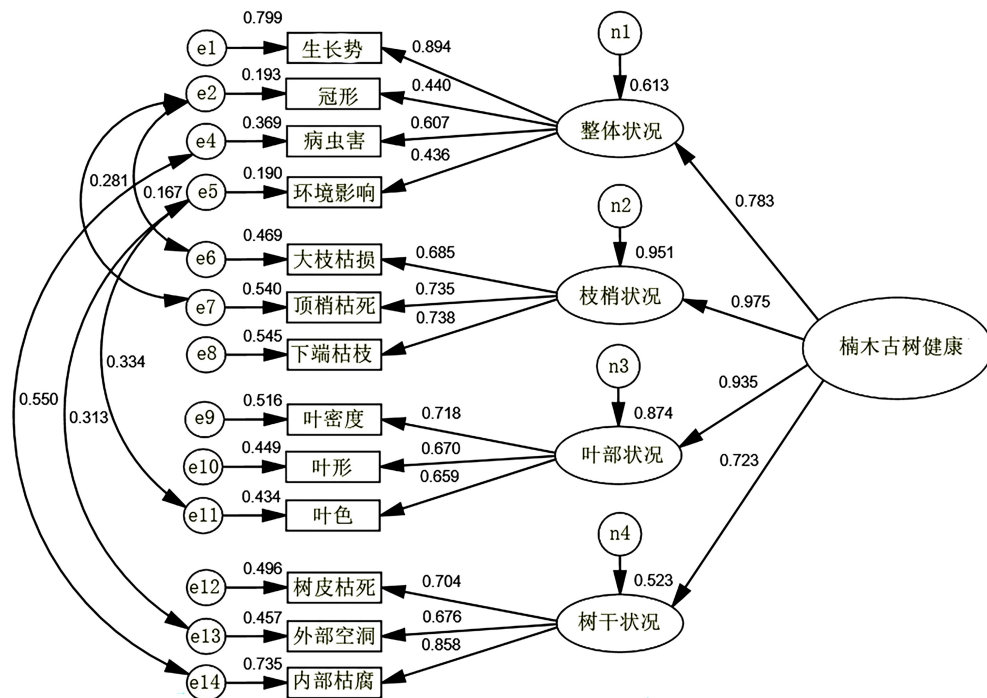


图 3 修正后结构方程模型路径

Figure 3 Modified structural equation model path

将标准化路径系数经归一化处理,计算出各评价指标的权重系数(表9)。

权重系数分析表明,决定古树健康的多维度指标体系中,枝梢状况与叶部状况为首要评价指

标(权重超27%),其重要性显著超越整体状况和树干状况。在这两项指标中,下端枯枝(9.76%)、顶梢枯死(9.72%)及叶密度(9.60%)是关键因素,这表明末端枯枝现象与叶片生长密度是评

估古树健康的核心观测点。在整体状况和树干状况两项指标中，冠形与环境的影响在评估体系中权重较低，显示当前评价体系更聚焦于生理健康本质，而非外在景观价值。

表9 健康评价指标权重及指标重要性排序

Table 9 Weight of health evaluation indicators and the ranking of index importance

潜在变量	权重	观测变量	权重	重要性排序
整体状况	0.229 2	生长势	0.086 2	7
		冠形	0.042 4	12
		病虫害	0.058 5	11
		环境影响	0.042 0	13
枝梢状况	0.285 4	大枝枯损	0.090 6	4
		顶梢枯死	0.097 2	2
		下端枯枝	0.097 6	1
		叶密度	0.096 0	3
叶部状况	0.273 7	叶形	0.089 6	5
		叶色	0.088 1	6
		树皮枯死	0.066 6	9
树干状况	0.211 7	外部空洞	0.063 9	10
		内部空腐	0.081 1	8

2.3 楠木古树健康评价结果

根据公式(4)与结构方程建模法得出的权重，

计算所调查的90株楠木古树的A健康程度值，并统计不同级别的楠木古树的A健康程度值(表10)。

表10 不同级别楠木古树健康状况

Table 10 Health status of ancient *Phoebe zhennan* of different grades

保护级别	健康		一般		较差		濒死(或死亡)		总计	
	株数	占比/%	株数	占比/%	株数	占比/%	株数	占比/%	株数	占比/%
一级	8	8.89	2	2.22	0	0.00	0	0.00	10	11.11
二级	18	20.00	5	5.56	0	0.00	0	0.00	23	25.56
三级	32	35.56	19	21.11	3	3.33	3	3.33	57	63.33
总计	58	64.44	26	28.89	3	3.33	3	3.33	90	100

由表10可以看出，通过评价，90株古树呈现明显的健康梯度分布。整体而言，约64.4%的植株保持健康状态，28.9%的植株处于一般水平，另有3.3%的植株出现生长衰退迹象，剩余3.3%的植株已濒死或死亡。值得注意的是，三级古树群体健康状况明显低于一、二级古树，其濒危比例较整体平均水平高出2个百分点，需作为重点保护对象加强监测与养护。

3 结论与讨论

3.1 以结构方程模型法构建出的楠木古树健康评价模型，综合考虑了整体状况、枝梢状况、叶部状况和树干状况，并通过数个定性或定量指标较为全面地反映树体的健康状况。通过赋值将各个指标结合起来综合考量，使健康评价的结果更具有客观性。

结构方程建模法构建出的模型经过了适配度

检验，满足楠木古树健康评价的要求，可应用于实际的楠木古树健康评价，但楠木古树的A健康程度值受到许多内在以及外在因素的共同作用，在一个评价体系中涉及所有的影响因素。因此不能轻易地判定某种模型的优劣，在应用时应当结合实际，综合把握。

结构方程模型要求样本量至少不低于观测变量的5倍，最好达到10至20倍^[24]。由于本研究的样本量较小，只有90，虽然已经达到了观测变量的5倍，但也会对模型结果的可信度带来一定的影响。

综合而言，用基于SEM构建的健康评价模型来评价楠木古树健康状况的方法是科学合理的，并且具有可行性。

3.2 以结构方程建模法构建的模型中，下端枯枝、顶梢枯死和叶密度在评价指标中的权重最高，是该模型中反映树木健康的关键指标。顶梢枯死是关键指标之一，这一点与王清麒等^[3]、翁殊斐

等^[8]、苏纯兰等^[7]学者的研究成果契合。顶梢枯死指树冠顶部由先端向下逐渐死亡,能够良好指示树木自身衰老与健康程度。而叶密度极大程度上反映了楠木古树进行光合作用的能力。

冠形在模型中的权重低,这与前人的研究结果不同,可能对于楠木来说,冠形可能因季节性变化、风力、光照等因素而有所波动,而这种变化并不总是与树木健康状态的长期变化相关^[25]。倾斜程度在模型的修正过程中被删去。这可能是由于研究区内楠木古树的树体倾斜程度总体较小(约80.00%的古树倾斜程度小于或等于5°)。

3.3 所调查的90株楠木古树中,处于较差状况、濒死(或死亡)的楠木古树均绝大部分为三级古树。这说明三级楠木古树相较于一级、二级楠木古树,抵御不良因素的能力较差,其健康状况更值得关注。该结论与王清麒^[3]等人的研究结果相反,这可能是由楠木的生长规律和生物学特性决定的^[7]:树龄较小的楠木应对病虫害、自然影响的能力相对较弱。

调查发现,健康状况处于较差的3株楠木古树,生长势衰退,其中有2株遭白蚁危害,枝叶稀疏且树顶枝干断裂,树干内部空腐严重,且其上方受到建筑物以及相邻树木的遮挡;另一株树皮大面积受损,存在内部空腐,枝叶枯损情况较为严重。濒临死亡的3株楠木古树,其中两株是白蚁虫害造成,另一株则是因天气干旱而濒临枯死。

因此,要更加关注楠木古树健康状况,及早采取合理有效的保护措施,尤其是要强化对三级楠木古树的保护。加强养护管理和病虫害防治,修补树洞以稳固树体等^[19]。及时对健康状况不佳的古树进行人为干预,尽可能使之恢复健康。

参考文献

[1] 务实. 全国绿化委员会部署古树名木普查建档工作[J]. 国土绿化, 2001(6): 4.
 [2] 林洪, 刘斌, 夏诗琪, 等. 基于文献计量的古树名木研究现状及热点分析[J]. 南方林业科学, 2024, 52(1): 74-78.
 [3] 王清麒, 袁文珊, 卿仕琦, 等. 国槐古树健康评价模型的构建及应用[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(1): 115-122.
 [4] 刘知宜. 古树名木是不可再生的“活化石”“不动产”[N]. 农民日报, 2023-08-31(8).

[5] 刘素芝, 何小东, 李建军. 基于知识粒度的森林生态系统健康评价指标赋权方法[J]. 生态学杂志, 2014, 16(4): 1082-1088.
 [6] 刘瑜, 徐程扬. 古树健康评价研究进展[J]. 世界林业研究, 2013, 26(1): 37-42.
 [7] 苏纯兰, 陈葵仙, 胡秋艳, 等. 基于层次分析法构建东莞市古树名木健康评价体系[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(2): 57-62.
 [8] 翁殊斐, 黎彩敏, 庞瑞君. 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, 2009, 24(1): 177-181.
 [9] 李佳慧, 彭祚登, 刘勇, 等. 北京市首都功能核心区国槐健康评价及其影响因素研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 64-73, 84.
 [10] 王巧, 聂鑫, 孙德浩, 等. 基于AHP-模糊综合评价法的泰山油松古树树势评价[J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(1): 137-146.
 [11] 温英萍. 林业可持续发展评价指标体系的构建[J]. 南方农业, 2021, 15(36): 82-84.
 [12] GARY W H, ED P, RICHARD E. Validation of a tree failure evaluation system[J]. Journal of Arboriculture, 1995, 21(5): 233-234.
 [13] 王一, 郝利娜, 赵美龄, 等. 2001-2018年重庆植被NDVI变化及其对气候因子和人类活动的响应[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 222-229.
 [14] 谭兴旺, 赵彬. 浅析楨楠生长与造林培育探究: 以重庆永川为例[J]. 河南农业, 2023(32): 30-32.
 [15] 邵鹏. 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, 2020.
 [16] 陈峻崎. 北京市古树健康评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
 [17] 刘方玲, 刘君, 姜竹颖, 等. 成都市古树名木资源现状分析及保护建议[J]. 现代园艺, 2022, 45(23): 196-199.
 [18] 杨玲, 康永祥, 李小军, 等. 黄帝陵古侧柏健康评价[J]. 浙江农林大学学报, 2014, 31(5): 779-784.
 [19] 于炜, 余金良, 钱江波, 等. 杭州古树树干空洞状况调查研究[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(2): 178-183.
 [20] 王占武, 张秀婷, 马国燕, 等. 基于结构方程模型的宫内人工授精影响因素的信度与效度分析[J]. 中国性科学, 2023, 32(6): 70-74.
 [21] 王保勇, 束昱. 探索性及验证性因素分析在地下空间环境研究中的应用[J]. 地下空间, 2000, 20(1): 14-22, 78-79.
 [22] 张莹, 杨睿哲, 彭晓霞, 等. 验证性因子分析原理, 模型及其在量表结构效度评价中的应用[J]. 中华健康管理学杂志, 2022, 16(6): 428-432.
 [23] 国家林业局. 古树名木鉴定规范: LY/T2737-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
 [24] SUHR D. The Basics of Structural Equation Modeling[M]. Cary, North Carolina: SAS Institute, 2006: 1-19.
 [25] 许沼山, 李亮, 王万胜, 等. 海岛大径级树木健康评价指标体系构建: 以上海大金山岛为例[J]. 植物科学学报, 2023, 41(5): 573-582.