

## 基于 AHP-模糊综合评价法的泰山油松古树树势评价

王巧<sup>1,2</sup>, 聂鑫<sup>1,2</sup>, 孙德浩<sup>1,2</sup>, 王华田<sup>1,2</sup>, 孟先鹏<sup>3</sup>, 曹桂萍<sup>3</sup>, 李健<sup>3</sup>, 黄昌豹<sup>3</sup>

(1. 山东省高校森林培育重点实验室, 山东 泰安 271018; 2. 国家林业局泰山森林生态系统定位研究站, 山东 泰安 271018; 3. 泰山风景名胜区管理委员会, 山东 泰安 271000)

**摘要:** 古树名木是人类宝贵的自然遗产, 科学准确地评价古树健康状况是实施古树名木保护与复壮的基础。选择有代表性的 15 株泰山油松 *Pinus tabuliformis* 古树, 运用层次分析法(AHP)和模糊综合评价法建立 AHP-模糊综合评价模型, 对泰山油松古树树势状况进行评价和分析。所调查的指标包括形态指标、生长指标、生理指标和枯死状态等 4 个方面共 14 个指标。研究表明: 15 株油松古树均呈现出不同程度的衰老表征, 轻度衰老古树 E0051 和 I0001 与健康油松相比, 各项指标没有明显下降; 中度衰老古树 D0110, E0043, G0002 等树冠残缺、枝条枯死、光合能力下降; J0008, E1108, E1097 和 E0002 树势衰老情况严重, 针叶稀疏、主枝及大枝大量枯死、细胞膜透性受到损伤。根据树势的不同, 对油松古树进行复壮养护处理。图 1 表 13 参 30

**关键词:** 森林生态学; 油松; 古树; AHP-模糊综合评价

**中图分类号:** S718.54      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2016)01-0137-10

## Vigor of old *Pinus tabuliformis* using the AHP-fuzzy comprehensive evaluation model

WANG Qiao<sup>1,2</sup>, NIE Xin<sup>1,2</sup>, SUN Dehao<sup>1,2</sup>, WANG Huatian<sup>1,2</sup>, MENG Xianpeng<sup>3</sup>,  
CAO Guiping<sup>3</sup>, LI Jian<sup>3</sup>, HUANG Changbao<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Silviculture of Shandong Province, Tai'an 271018, Shandong, China; 2. Taishan Forest Ecological Research Station of the State Forestry Administration, Tai'an 271018, Shandong, China; 3. Taishan Scenic Area Management Committee, Tai'an 271000, Shandong, China)

**Abstract:** In response to concern for negative effects of air pollution and destroyed environment, a serious worry is now increasing in China. Monitoring forest health is important for the protection of plants. Old and famous trees are a natural human heritage. So, to scientifically and accurately assess the health status of old trees for better protection is necessary for managing the forest, fifteen old *Pinus tabuliformis* trees in Taishan were chosen, and an analytic hierarchy process AHP-fuzzy comprehensive evaluation model was used. Fourteen indexes were studied in total including morphological index, growth index, physiological index, and deadwood states. Field investigations were took in the research along with laboratory experiments. Three of the fourteen indexes were studied in the laboratory including the content of chlorophyll, photosynthetic rate and cell membrane permeability. The rest were investigated in the outside. Results showed that all fifteen old *P. tabuliformis* trees had aging characteristics. Compared to healthy trees, two had low grade senescence with only slight decreases in indexes, higher chlorophyll content, photosynthetic rate and cell membrane permeability, luxuriant foliage, intact bark and several dead shoots. Six showed moderate senescence with an incomplete canopy, dead branches, and decreased photosynthetic capability. Four were unhealthy with sparse needles, a large number of dead main branches and limbs, and damaged cell membrane permeability. According to the vigor of old *P. tabuliformis*

收稿日期: 2015-02-14; 修回日期: 2015-04-03

基金项目: 国家林业公益行业科研专项(201104002-6); 山东省泰安市科技计划项目(2011-40)

作者简介: 王巧, 从事风景林与城市林研究。E-mail:1029379692@qq.com。通信作者: 王华田: 教授, 博士生导师, 从事森林培育与森林生态等研究。E-mail: wanght@sdau.edu.cn

trees, a series of protection measures were put forward including pest control, setting the fences, spreading fertilizer, pruning. [Ch, 1 fig. 13 tab. 30 ref.]

**Key words:** forest ecology; *Pinus tabulaeformis*; old trees; AHP-fuzzy comprehensive evaluation

古树, 历经千百年, 具有珍贵的历史价值。众多的古树名木, 或傍倚峭壁, 或伫立幽处, 或点缀在古建筑的周围, 显现着它的古朴与庄严。由于生长年代久远, 生长势衰弱日趋明显、病虫害侵入、抗逆性差、枯枝死枝树木增多、根系扩张能力萎缩等原因, 古树树体整个外部形态及生理功能都发生衰退。由于自然衰老、各种自然或人为因素的长期干扰, 古树的健康状况普遍存在着或多或少的问题。由于不能及时有效地评价古树树势, 导致古树发生不可逆衰老并死亡。因此, 研究并提出古树树势评价体系, 及时对古树健康状况做出科学准确的诊断, 并有针对性地实施相应的保护措施, 对提高古树健康水平、延缓古树衰老是十分必要的。美国早在 20 世纪 60 年代就建立 Paine 系统用于树木的健康预测<sup>[1-2]</sup>, 随后建立分类指标评价体系对树木健康状况进行评价, 并指出树木的倾斜状况、树干和树势是表征树木健康的重要指标<sup>[3-6]</sup>。以往, 在古树健康诊断和评价方面, 依据树冠及生长量确定古树健康状况应用较多, 但缺乏准确性<sup>[7-9]</sup>; 采用木材无损检测的物理方法可以比较精确地对树干的腐朽情况做出判断, 但针对生长势与其树干的腐朽程度之间的关系还缺乏系统的研究<sup>[10-11]</sup>。国内有关古树的研究主要集中在古树名木资源调查、保护复壮技术及病虫害防治等方面, 而针对古树健康诊断和树势评价方法的研究不足, 尚未形成系统的评价体系和评价模型。现有研究一般依据树木的生长势和生活力<sup>[12]</sup>等方面简单地对古树生长状况或树势进行评价, 或从古树整体状况、树冠、树干、根部等方面选择数个表观指标构建树木健康评价体系以划分古树的等级<sup>[13-17]</sup>, 或者尝试用应力波技术检测树木生长状况<sup>[18-19]</sup>。上述研究对推动中国古树健康诊断和树势评价的研究奠定了良好基础, 但多数研究工作偏重于外在表观性状的简单观测, 难以从古树衰老生理角度准确把握树势。本研究以泰山油松 *Pinus tabulaeformis* 古树为研究对象, 总结影响古树健康生长的各方面因素, 归纳整理国内外对古树健康评价体系的研究, 从油松外部形态、生长特征及生理特性方面运用层次分析法(AHP)-模糊综合评价法构建了油松树势评价体系, 并且选择泰山各景区 15 株油松古树外观形态及生理生态等 14 个指标对其进行健康评价, 以期对泰山油松古树保护提供理论基础。

## 1 研究区域与研究对象

### 1.1 研究区域概况

泰山地处山东省中部(36°05'~36°15'N, 117°05'~117°24'E), 风景区总面积为 426 hm<sup>2</sup>, 属暖温带湿润半湿润季风气候区, 地势险峻。主峰海拔为 1 545 m, 南部山麓海拔 140 m, 相对高差 1 400 m, 梯度变化明显。山下年平均气温为 12.8 °C, 年平均降水量为 725.5 mm, 山顶年均气温为 5.3 °C, 年平均降水量为 1 151.7 mm。泰山母岩以花岗岩、片麻岩及过渡性岩石为主, 土壤以中性棕壤为主, 微酸性。

### 1.2 研究对象选择

选取有代表性的泰山油松 15 株, 包括玉泉寺 J0008(一亩松); 后石坞 E000(姊妹松), E0013, E0016, E0043, E0046 及 E0051; 桃花峪 I0001(凤松); 对松山 E1096, E1097, E1108; 中天门 D0110, D0111(五大夫松); 扇子崖 6001(增幅松)及普照寺 G0002(一品大夫), 运用 AHP-模糊评价模型进行树势综合评价, 得到 15 株古树树势生长状况。所调查油松古树分布情况和基本状况见图 1 和表 1。

## 2 研究方法

### 2.1 指标的测定分析

选取的 15 株油松古树, 实测树高误差±0.1 m, 胸径(±0.1 cm), 冠幅(±0.1 m)。目测并计数各级枝条枯死程度和主干树皮损伤面积, 其中各级枝条主要指直接从主干上分生出来的粗大枝条、主枝上分生出来的大枝和大枝末端着生的细枝。

从树冠中上部外围东、西、南、北 4 个方向各选择 1 个有代表性的标准枝, 高枝剪采下, 立即用便携式光合测定系统(CIRAS-2)测定现存针叶光合速率( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 重复 3 次。钢卷尺测定标准枝连续

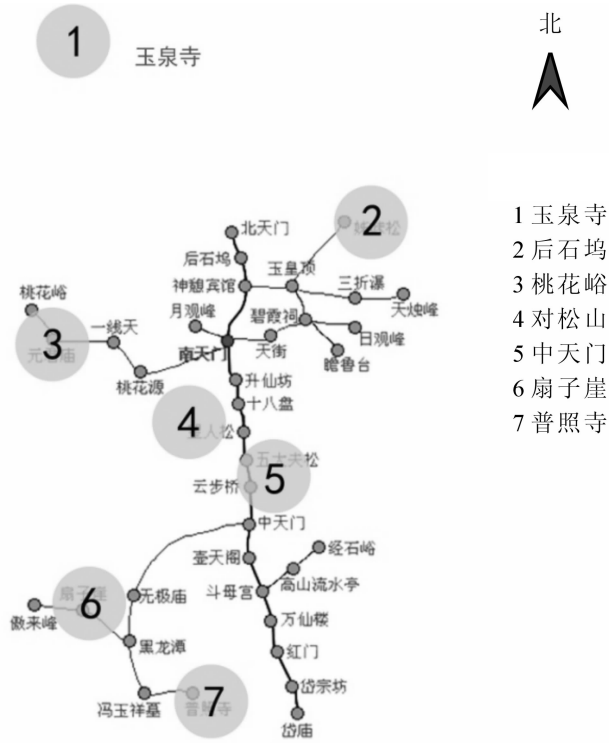


图 1 泰山油松古树分布

Figure 1 Distribution of old *Pinus tabulaeformis* trees in Mount Taishan

表 1 油松生长情况

Table 1 Growth of the 15 old *P. tabulaeformis* trees

编号	俗名	树龄/a	位置	海拔高度/m	树高/m	胸径 /cm	冠幅/(m×m)	表观生长势
E0051		300	后石坞	1 402	6.50	47.00	10.40 × 12.70	较健壮
I0001	风松	200	桃花峪	289	4.00	53.00	16.70 × 13.10	较健壮
G0736	增幅松	200	扇子崖	705	3.90	43.80	12.90 × 10.00	较健壮
D0110	五大夫松	284	中天门	937	3.09	51.00	12.50 × 13.00	轻度衰弱
E0043		300	后石坞	1 399	7.90	65.00	9.90 × 14.50	轻度衰弱
G0002	一品大夫	300	普照寺	231	3.90	39.00	9.70 × 12.50	轻度衰弱
E0016		300	后石坞	1 435	6.50	68.40	10.80 × 12.00	中度衰弱
D0111	五大夫松	284	中天门	937	6.50	49.00	10.70 × 12.70	中度衰弱
E1096		300	对松山	1 160	10.00	62.00	9.00 × 13.00	中度衰弱
E0046		300	后石坞	1 400	6.50	47.00	10.40 × 12.70	中度衰弱
E0013		300	后石坞	1 420	13.70	56.30	9.50 × 8.80	重度衰弱
J0008	一亩松	800	玉泉寺	638	12.50	102.22	26.80 × 33.50	重度衰弱
E1108		300	对松山	1 153	11.50	60.00	8.00 × 10.70	重度衰弱
E1097		300	对松山	1 155	8.00	70.50	8.70 × 10.50	重度衰弱
E0002	姊妹松	300	后石坞	1 403	5.50	37.90	6.90 × 5.20	重度衰弱

说明：古树树龄为估计值，表观生长势为目测估计树势状况。

5 a 生长量(±0.1 cm)，查数标准枝现在针叶数量。取标准枝现存针叶 5 束，钢卷尺测定油松针叶长度(±0.10 cm)，游标卡尺测定油松针叶粗度(±0.01 mm)。取标准枝现存针叶 30 束，装入塑料自封袋内，置于冰盒内带回实验室，其中 15 束采用分光光度法测定叶绿素质量分数(TU-1900 双光束紫外可见分光光度计，mg·g<sup>-1</sup>)，另外 15 束采用电导率仪(INESA DDSJ-308A)测定针叶的电导率并计算相对电导率(%)，各重复 3 次。

## 2.2 AHP-模糊综合评价模型的建立

2.2.1 指标权重的确定 采用层次分析法(AHP)来确定指标权重。按照所建立的指标体系，根据各指标

的重要性不同，建立各个指标间的两两判断矩阵，采用德尔菲法用 1~9 标度表对各指标的重要程度进行标度。通过对判断结果进行整理后得到判断矩阵，运用 Matlab 数学工具计算判断矩阵的最大特征值和特征根对应的归一化向量，并且检验判断矩阵的一致性， $\lambda_{\max}$  对应的归一化特征向量  $w=(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$  的各个分量就是本准则层中各指标的相对重要性的权重值，即相应指标的单排序权重。为了检验判断矩阵的一致性，需计算出一致性指标  $I_{CI}$  和随机一致性比率  $R_{CR}$ 。 $I_{CI}=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)$ ， $R_{CR}=I_{CI}/I_{RI}$ 。 $I_{RI}$  为平均随机一致性指标，通过查表(表 3)可得。当  $R_{CR}<0.10$  时，认为判断矩阵具有满意的一致性，否则对判断矩阵的元素取值进行调整。

2.2.2 隶属度矩阵的确定 建立评价等级标准集合  $Q=\{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$ ，其中  $n$  为评价标准所分的级别数目，评价标准可以是定性的描述性评语，也可以是量化值。用隶属度分别描述各指标对于评

表 2 判断矩阵中元素的赋值标准

Table 2 Assignment standard of elements in the judgment matrix

重要性标度	说明
1	2 个元素相比，具有同等重要性
3	2 个元素相比，前者比后者稍微重要
5	2 个元素相比，前者比后者明显重要
7	2 个元素相比，前者比后者非常重要
9	2 元素相比，前者比后者极其重要
2, 4, 6, 8	介于上述相邻判断的中间值
倒数	2 个元素的反比较

表 3 平均随机一致性指标  $I_{RI}$  值

Table 3 Average consistencies of random matrices

$n$	$I_{RI}$	$n$	$I_{RI}$
1	0	6	1.24
2	0	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12		

价标准集  $Q$  的隶属程度，得到模糊评价矩阵。 $R_i=$

$$R_i = \begin{pmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \dots & r_{i1n} \\ r_{i21} & r_{i22} & \dots & r_{i2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{im1} & r_{im2} & \dots & r_{imn} \end{pmatrix}。R_i \text{ 为第 } i \text{ 个准则的隶属度矩阵}(i=$$

1, 2, 3, 4),  $im$  表示第  $i$  个准则所含的指标数目为  $m$ 。定性与定量指标隶属程度的确定参见张丽娜<sup>[20]</sup>的方法。

2.2.3 模糊综合评价 本研究选用模糊合成算子  $M(\cdot, \oplus)$  算子，逐步进行一级、二级综合评价。①一级综合评价：

$$B_i + W_c \circ R_i = (W_{c1}, W_{c2}, \dots, W_{cm}) \circ \begin{pmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \dots & r_{i1n} \\ r_{i21} & r_{i22} & \dots & r_{i2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{im1} & r_{im2} & \dots & r_{imn} \end{pmatrix} = (B_{i1}, B_{i2}, B_{i3}, B_{i4})。$$

其中： $B_i$  为第  $i(i=1, 2, 3, 4)$  准则的模糊综合评价， $W_{cm}$  表示第  $i(i=1, 2, 3, 4)$  准则层下第  $m$  个指标对于准则层  $i$  的权重值。②二级综合评价：根据一级综合评价的结果及准则层  $B$  相对于目标层  $A$  的权重，计算出最终的综合评判结果。

$$S = W_B \circ B = (W_{B1}, W_{B2}, \dots, W_{Bn}) \circ \begin{pmatrix} W_{c1} \circ R_1 \\ W_{c2} \circ R_2 \\ \vdots \\ W_{cn} \circ R_n \end{pmatrix} = (S_1, S_2, \dots, S_n)。$$

### 3 研究结果

#### 3.1 树势评价指标体系

基于树势评价的内涵、基本理论和基本原则，在综合国内外研究成果的基础上，结合油松古树的实际情况，将油松古树树势评价指标体系设计分为目标层、准则层和指标层。其具体框架如表 4 所示。

#### 3.2 指标权重

根据油松古树树势评价指标重要度比较调查表，对各个因素的重要程度进行两两比较，通过对判断

结果进行整理后得到判断矩阵，运用 Matlab 数学工具计算判断矩阵的最大特征值和特征根对应的归一化向量，并且检验判断矩阵的一致性，确定的权系数结果如表 5~9 所示。表 5~9 中一致性检验值  $C_R$  均小于 0.10，所以  $B_1-C$ ， $B_2-C$ ， $B_3-C$ ， $B_4-C$ ， $A-B$  判断矩阵均具有满意的一致性。

根据各判断矩阵层次排序与权重系数赋值的结果，可得到  $C$  层各指标对于目标层  $A$  的权重系数各指标重要性排序如表 10 所示，其中新梢生长量、叶绿素含量、主枝枯死状态为评价油松古树树势较为重要的指标，小枝的枯死状况、树干和树皮的损伤程度对评价古树树势影响不大。

### 3.3 树势评价标准

本研究针对泰山油松古树的实际情况，借鉴有关历史资料及相关文献，并结合专家评判等方法来确定指标评价标准(表 11~12)。

### 3.4 模糊综合评价结果

对 15 株油松古树进行综合评价后可知：不同健康程度的油松古树数量所占的比例表现为中度衰弱>轻度衰弱>重度衰弱>健壮古树，无濒危古树。所调查油松古树的年龄均在 200 a 以上，由于长时

表 4 油松古树树势评价指标体系

Table 4 Index system for evaluating vigor of old *Pinus tabulaeformis* trees

目标层 A	准则层 B	指标层 C
油松古树树势评价 A	形态指标 $B_1$	树冠 $C_{11}$
		树干 $C_{12}$
		树皮 $C_{13}$
	生长指标 $B_2$	叶片数量 $C_{21}$
		叶片长度 $C_{22}$
		叶片粗度 $C_{23}$
		萌芽抽枝数量 $C_{24}$
		新梢生长量 $C_{25}$
	生理指标 $B_3$	光合速率 $C_{31}$
		叶绿素含量 $C_{32}$
		细胞膜透性 $C_{33}$
	枯死状态 $B_4$	主枝状态 $C_{41}$
		大枝状态 $C_{42}$
		小枝状态 $C_{43}$

表 5  $B_1-C$  判断矩阵及权系数结果

Table 5  $B_1-C$  judgment matrix and weights

	树冠 $C_{11}$	树干 $C_{12}$	树皮 $C_{13}$	权系数 $W$
树冠 $C_{11}$	1	2	3	0.539 6
树干 $C_{12}$	1/2	1	2	0.297 0
树皮 $C_{13}$	1/3	1/2	1	0.163 4
一致性检验	$\lambda_{\max}=3.009 2$ ; $I_{CI}=0.004 6$ ; $I_{RI}=0.580 0$ ; $E_{CR}=0.007 9<0.1000 0$			

表 6  $B_2-C$  判断矩阵及权系数结果

Table 6  $B_2-C$  judgment matrix and weights

	叶片数量 $C_{21}$	叶片长度 $C_{22}$	叶片粗度 $C_{23}$	萌芽抽枝数量 $C_{24}$	新梢生长量 $C_{25}$	权系数 $W$
叶片数量 $C_{21}$	1	1	2	1/2	1/4	0.131 4
叶片长度 $C_{22}$	1	1	2	1	1/3	0.157 9
叶片粗度 $C_{23}$	1/2	1/2	1	1/2	1/4	0.086 0
萌芽抽枝数量 $C_{24}$	2	1	2	1	1/2	0.197 8
新梢生长量 $C_{25}$	4	3	4	2	1	0.426 8
一致性检验	$\lambda_{\max}=5.074 6$ ; $I_{CI}=0.018 7$ ; $I_{RI}=1.120 0$ ; $E_{CR}=0.016 6<0.100 00$					

表 7  $B_3-C$  判断矩阵及权系数结果

Table 7  $B_3-C$  judgment matrix and weights

	光合速率 $C_{31}$	叶绿素 $C_{32}$	细胞膜透性 $C_{33}$	权系数 $W$
光合速率 $C_{31}$	1	1/2	2	0.310 8
叶绿素 $C_{32}$	2	1	2	0.493 4
细胞膜透性 $C_{33}$	1/2	1/2	1	0.195 8
一致性检验	$\lambda_{\max}=3.053 6$ ; $I_{CI}=0.026 8$ ; $I_{RI}=0.580 0$ ; $E_{CR}=0.046 2<0.100 0$			



表8 B<sub>4</sub>-C判断矩阵及权系数结果

Table 8 B<sub>4</sub>-C judgment matrix and weights

	主枝 C <sub>41</sub>	大枝 C <sub>42</sub>	小枝 C <sub>43</sub>	权系数 W
主枝 C <sub>41</sub>	1	3	5	0.648 3
大枝 C <sub>42</sub>	1/3	1	2	0.229 7
小枝 C <sub>43</sub>	1/5	1/2	1	0.122 0
一致性检验	$\lambda_{\max}=3.003 7; I_{CI}=0.001 9; I_{RI}=0.580 0; E_{CR}=0.003 2<0.100 0$			

表9 A-B判断矩阵及权系数结果

Table 9 A-B judgment matrix and weights

	形态指标 B <sub>1</sub>	生长指标 B <sub>2</sub>	生理指标 B <sub>3</sub>	枯死状况 B <sub>4</sub>	权系数 W
形态指标 B <sub>1</sub>	1	1/5	1/4	1/4	0.068 4
生长指标 B <sub>2</sub>	5	1	2	2	0.433 4
生理指标 B <sub>3</sub>	4	1/2	1	2	0.292 2
枯死状况 B <sub>4</sub>	4	1/2	1/2	1	0.206 0
一致性检验	$\lambda_{\max}=4.088 4; I_{CI}=0.029 5; I_{RI}=0.900 0; E_{CR}=0.032 7<0.100 0$				

表10 油松古树树势评价指标体系及其权重

Table 10 *Pinus tabulaeformis* vigor assessment indicator system and relevant weight

目标层 A	准则层 B	权重	指标层 C	C层指标相对于B层的权重	C层指标对于A层的权重	重要性总排序
油 松 古 树 树 势 评 价 A	形态指标 B <sub>1</sub>	0.064 8	树冠 C <sub>11</sub>	0.539 6	0.035 0	11
			树干 C <sub>12</sub>	0.297 0	0.019 2	13
			树皮 C <sub>13</sub>	0.163 4	0.010 6	14
	生长指标 B <sub>2</sub>	0.433 4	叶片数量 C <sub>21</sub>	0.131 4	0.056 9	8
			叶片长度 C <sub>22</sub>	0.157 9	0.068 4	6
			叶片粗度 C <sub>23</sub>	0.086 0	0.037 3	10
			萌芽抽枝数量 C <sub>24</sub>	0.197 8	0.085 7	5
	生理指标 B <sub>3</sub>	0.292 2	新梢生长量 C <sub>25</sub>	0.426 8	0.185 0	1
			光合速率 C <sub>31</sub>	0.310 8	0.090 8	4
			叶绿素含量 C <sub>32</sub>	0.493 4	0.144 2	2
			细胞膜透性 C <sub>33</sub>	0.195 8	0.057 2	7
	枯死状态 B <sub>4</sub>	0.206 0	主枝状态 C <sub>41</sub>	0.648 3	0.133 5	3
			大枝状态 C <sub>42</sub>	0.229 7	0.047 3	9
			小枝状态 C <sub>43</sub>	0.122 0	0.025 1	12

表11 定量指标评价标准

Table 11 Criteria for quantitative evaluation indicators

评价指标	I 健壮	II 轻度衰弱	III 中度衰弱	IV 重度衰弱	V 濒危
C <sub>5</sub> 针叶长度 /cm	14.0	12.0	10.0	8.0	6.0
C <sub>6</sub> 针叶粗度 /mm	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8
C <sub>8</sub> 连年生长量 /cm	15.0	12.0	9.0	6.0	3.0
C <sub>9</sub> 净光合速率/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5
C <sub>10</sub> 叶绿素/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8
C <sub>11</sub> 细胞膜透性 /%	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0

间的生长，自然环境及人类活动对其造成的不利影响也不断积累，因此，15株油松古树树势均存在一定程度上的衰弱表征。E0051和I0001树势无明显的衰弱，树冠生长旺盛，叶片颜色浓绿、鲜亮；主枝、大枝及小枝枯死量较少；针叶中叶绿素质量分数高，光合作用旺盛，积累大量的有机物，供给油松古树的生长需求。G0736，D0110，E0043和G0002与健壮树相比，有明显的衰弱表征，树冠生长状况

表 12 定性指标评价标准

Table 12 Criteria for qualitative evaluation indicators

指标	I 健壮	II 轻度衰弱	III 中度衰弱	IV 重度衰弱	V 濒危
C <sub>1</sub> 树冠	饱满, 完全没有残缺	尚饱满, 略有残缺, 但较 I 缺损不超过 30%	残缺, 树冠较正常情况残缺超过 50%	严重残缺, 树冠较正常情况残缺超过 80%	濒危, 树冠残存活枝叶 10% 以下, 难以继续维持生命
C <sub>2</sub> 树干	饱满, 未见损伤	轻微损伤, 有小面积损伤, 但不影响正常功能	中度损伤, 有明显创伤和病腐, 但树势未见严重衰弱	重度损伤, 树干劈裂或形成腐朽树洞	极度损伤, 树干严重破损, 腐朽树洞数量多, 心腐部分超过树干 80%
C <sub>3</sub> 树皮	健壮, 完好无损	轻度损伤, 宽度不超过树干周长 20%, 长度不超过 20 cm	中度损伤, 宽度超过树干周长 40%, 长度超过 50 cm	重度损伤, 宽度超过树干周长 60%, 长度超过 100 cm	极度损伤, 宽度超过树干周长 80%, 长度超过 200 cm
C <sub>4</sub> 叶片数量	枝繁叶茂, 树冠茂密	叶片多, 浓郁成荫	树冠稀疏, 叶片较多	枝叶稀疏, 叶片稀少	残存少量叶片
C <sub>7</sub> 萌芽抽枝数量	健壮, 与健壮树相比, 萌芽抽枝数量和比例与健壮树相似, 没有明显下降	尚健壮, 萌芽抽枝数量和比例不低于健壮树的 80%	中等, 萌芽抽枝数量和比例仅相当于健壮树的 50%	较弱, 萌芽抽枝数量和比例明显减小	严重衰弱, 萌芽抽梢很少, 或几乎没有抽梢
C <sub>12</sub> 主枝状态	个别主枝枯死	少数主枝枯死 (2~3 个), 枯死主枝不超过全树的 20%	大量主枝枯死 (3~5 个), 枯死主枝超过全树的 50%	多数主枝枯死 (5~7 个), 枯死主枝超过全树的 80%	仅存个别活枝
C <sub>13</sub> 大枝状态	个别大枝枯死	少数大枝枯死 (2~3 个), 枯死大枝不超过全树的 20%	大量大枝枯死 (3~5 个), 枯死大枝超过全树的 50%	多数大枝枯死 (5~7 个), 枯死大枝超过全树的 80%	仅存个别活枝
C <sub>14</sub> 小枝状态	个别小枝枯死	少数小枝枯死, 枯死小枝不超过全树的 20%	大量小枝枯死, 枯死小枝超过全树的 50%	多数小枝枯死, 枯死小枝超过全树的 80%	仅存个别活枝

良好, 叶色正常; 主枝及大枝有部分枯死情况, 小枝枯枝率 < 30%; 光合能力较强, 生长状况尚好。E0016, D0111, E0013, E1096, E0046 和 J0008 属中度衰弱古树, 树冠残缺较严重, 针叶颜色偏浅; 小枝枯死率 > 30%, < 50%; 叶绿素质量分数低, 光合作用能力弱, 细胞膜透性大, 易受损伤。E1108, E1097, E0002 均重度衰弱, 枝叶稀疏, 叶片稀少; 针叶细短, 枝梢连年生长量不足健壮树的 30%, 萌芽率低甚至不能萌芽; 光合作用减弱, 异化作用加强, 大量有机物质分解; 大量枝条枯死, 各项指标均处于较低的水平, 急需采取措施对其进行复壮管理。

#### 4 讨论与结论

树势评价是古树名木管护与复壮的前提和基础<sup>[21-22]</sup>。科学合理地诊断和评价古树生长势, 并采取有针对性的复壮技术措施, 才能延缓古树衰老进程, 提高古树名木的景观效果。本研究在野外调查和监测的基础上, 选择合理的指标, 构建评价体系, 运用层次评价(AHP)-模糊综合评价方法对泰山古油松树势进行了树势评价, 评价结果与野外调查时对油松古树的表观生长势基本一致, 其中 E0051 和 I0001 生长状况良好, 属于较健壮的古树; G0736, D0110, E0043 和 G0002 有明显的衰弱表征, 属于轻度衰弱古树; E0016, D0111, E1096, E0013, E0046 和 J0008 树冠残缺、枝条枯死, 属于中度衰弱古树; E1097, E1108 和 E0002 主枝和大枝枯死严重, 生长势较弱, 属于重度衰弱古树。说明本研究选择的评价指标和构建的评价指标体系以及所采用的综合评价方式是可行的。通过树势评价和定期监测诊断古树生长状况, 采取措施改善油松古树生境, 维持、恢复和复壮树势, 以延缓古树的衰老。对于重点油松名木古树, 一旦出现异常衰老或濒危现象, 应及时邀请有关专家进行现场会诊, 参照以往的日常管护复壮方案及实施效果, 采取有针对性或抢救性的复壮措施。

表 13 油松古树树势评价结果

Table 13 Result of the *Pinus tabulaeformis* vigor assessment

油松编号	健壮	轻度衰弱	中度衰弱	重度衰弱	濒危	综合评分	树势
E0051	0.345 3	0.618 6	0.032 5	0.000 0	0.000 0	82.550 0	健壮
I0001	0.504 6	0.281 7	0.173 0	0.037 0	0.000 0	81.162 5	健壮
G0736	0.312 1	0.355 5	0.256 0	0.072 8	0.000 0	72.492 5	轻度衰弱
D0110	0.215 9	0.399 7	0.285 3	0.095 5	0.000 0	68.220 0	轻度衰弱
E0043	0.171 2	0.508 1	0.182 1	0.135 0	0.000 0	67.707 5	轻度衰弱
G0002	0.136 8	0.524 8	0.135 2	0.150 4	0.034 5	63.560 0	轻度衰弱
E0016	0.025 0	0.392 0	0.379 1	0.200 5	0.000 0	55.867 5	中度衰弱
D0111	0.066 2	0.362 6	0.382 6	0.055 5	0.129 5	54.332 5	中度衰弱
E1096	0.091 3	0.372 5	0.239 9	0.128 3	0.164 3	52.270 0	中度衰弱
E0013	0.013 3	0.397 0	0.332 2	0.012 2	0.241 6	48.020 0	中度衰弱
E0046	0.010 0	0.365 7	0.230 1	0.251 2	0.139 3	46.212 5	中度衰弱
J0008	0.042 2	0.164 2	0.407 8	0.295 8	0.088 3	44.320 0	中度衰弱
E1097	0.000 0	0.194 9	0.310 0	0.212 0	0.279 5	35.417 5	重度衰弱
E1108	0.000 0	0.032 0	0.423 2	0.452 2	0.093 0	34.865 0	重度衰弱
E0002	0.000 0	0.025 6	0.232 0	0.466 2	0.272 5	25.17 50	重度衰弱

说明：综合评分  $Q=S_1 \times 90+S_2 \times 70+S_3 \times 50+S_4 \times 30+S_5 \times 10$ ， $S$  为二级模糊综合评价结果。 $Q \geq 80$  为健壮， $80 > Q \geq 60$  为轻度衰弱， $60 > Q \geq 40$  为中度衰弱， $40 > Q \geq 20$  为重度衰弱， $20 > Q \geq 0$  为濒危。

AHP-模糊综合评价方法将层次分析法与模糊综合评价法相结合，运用了定量与定性相结合的系统分析和模糊数学与模糊统计的方法，对解决复杂的具有模糊性的问题更可信、可靠更具客观性，广泛应用于植物景观美感评价<sup>[23]</sup>、岛礁战略价值的评价<sup>[24]</sup>、林业专业合作组织满意度评价<sup>[25]</sup>、野生动物新发传染病虹彩病毒的风险评估<sup>[26]</sup>等各个领域。AHP-模糊综合评价法易于实现程序化、可操作性强、直观易懂，具有较好的应用价值，在油松古树树势评价过程中应用 AHP-模糊综合评价法实现了非量化因素的可量化研究，客观全面地分析评价了油松古树树势，是一个正确的选择。

古树树势评价指标选择和评价指标体系的构建要有针对性。以油松的整体形态<sup>[27]</sup>、针叶及枝梢的生长量、枯枝数量、光合速率、叶绿素含量<sup>[28-29]</sup>等生理指标所构建的油松古树树势评价指标体系，综合考虑了指标获取的难易程度，体现了光合碳同化能力对油松古树树势的决定性影响，因此能够科学而准确地评价油松古树的树势状况。

今后研究工作中，为了弥补古树健康状况评价体系定量指标较少、定性描述较多导致的古树树势评价局限性这一缺陷，应加强监测指标选取的针对性、定性指标数量化、增加定量指标数量等方面开展研究<sup>[21,30]</sup>，并通过构建完善的评价体系，提高古树名木树势评价的针对性和准确性，为采取及时有效的管护复壮措施提供依据。

## 5 参考文献

- [1] PAINE L A. *Accident Hazard Evaluation and Control Decisions on Forested Recreation Sites: Res Paper PSW-68* [R]. Berkeley: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, USDA, 1971.
- [2] PAINE L A. *Administrative Goals and Safety Standards for Hazard Control on Forested Recreation Sites: Res Paper PSW-RP88* [R]. Berkeley: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, USDA, 1973.
- [3] BAKKEN S R. *Tree Hazard Control Program: Guidelines and Standards for the California Department of Parks and Recreation* [R]. Sacramento: California Department of Parks and Recreation, Sacramento, CA, 1986.
- [4] HICKMAN G W, CAPRILE J, PERRY E. Oak tree hazard evaluation [J]. *J Arbor(USA)*, 1989, **55**(8): 177 - 184.
- [5] HICKMAN G W, PERRY E, EVANS R. Validation of a tree failure evaluation system [J]. *J Arbor*, 1995, **21**: 233 - 233.
- [6] JIM C Y. Multipurpose census methodology to assess urban forest structure in Hong Kong [J]. *Arbor Urban For*, 2008, **34**(6): 366 - 378.



- [7] DOBBERTIN M. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review [J]. *Euro J For Res*, 2005, **124**(4): 319 – 333.
- [8] BOONE R, WESTOOD R. An assessment of tree health and trace element accumulation near a coal-fired generating station, Manitoba, Canada [J]. *Environ Monitor Assess*, 2006, **121**(1/3): 151 – 172.
- [9] DROBYSHEV I, ANDERSON S, SONESSON K. Crown condition dynamics of oak in southern Sweden 1988–1999 [J]. *Environ Monitor Assess*, 2007, **134**(1/3): 199 – 210.
- [10] BUTNOR J R, PRUYN M L, SHAW D C. Detecting defects in conifers with ground penetrating radar: applications and challenges [J]. *For Pathol*, 2009, **39**(5): 309 – 322.
- [11] BIEKER D, KEHR R, WEBER G, *et al.* Non-destructive monitoring of early stages of white rot by *Trametes versicolor* in *Fraxinus excelsior* [J]. *Ann For Sci*, 2010, **67**(2): 1 – 7.
- [12] 叶有华, 虞依娜, 彭少麟, 等. 澳门松山公园树木健康评估[J]. 热带亚热带植物学报, 2009, **17**(2): 131 – 136.  
YE Youhua, YU Yina, PENG Shaolin, *et al.* Evaluation of tree health in Songshan Park, Macao [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2009, **17**(2): 131 – 136.
- [13] 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.  
WENG Shufei, LI Caimin, PANG Ruijun. Establishment of landscaping tree health assessment model using analytic hierarchy process [J]. *J Northwest For Univ*, 2009, **24**(1): 177 – 181.
- [14] 黎彩敏, 翁殊斐, 庞瑞君. 广州市 14 种常用园林树木健康评价[J]. 西北林学院学报, 2010, **25**(2): 203 – 207.  
LI Caimin, WENG Shufei, PANG Ruijun. Tree health assessment of fourteen landscape tree species in Guangzhou [J]. *J Northwest For Univ*, 2010, **25**(2): 203 – 207.
- [15] 刘嘉, 杨莉雷, 陆小平. 苏州城区古树名木的树势评价[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(36): 20806 – 20809.  
LIU Jia, YANG Lilei, LU Xiaoping. Tree vigor evaluation of ancient and famous trees in Suzhou City [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2010, **38**(36): 20806 – 20809.
- [16] 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.  
YANG Ling, KANG Yongxiang, LI Xiaojun, *et al.* Health of ancient *Platycladus orientalis* in the Mausoleum of the Yellow Emperor [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2014, **31**(5): 779 – 784.
- [17] 张学星, 施莹, 周筑, 等. 云南城市行道树选择及综合评价研究[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(6): 922 – 926.  
ZHANG Xuexing, SHI Ying, ZHOU Zhu, *et al.* Evaluation and selection for avenue tree in Yunnan, China [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2011, **28**(6): 922 – 926.
- [18] 陈勇平, 刘秀英, 李华, 等. 不同数量传感器下云杉模拟缺陷材应力波成像规律探讨[J]. 林业科学, 2012, **48**(4): 97 – 101.  
CHEN Yongping, LIU Xiuying, LI Hua, *et al.* Research on stress wave tomography of spruce logs with artificial defects under different number sensors [J]. *Sci Silv Sin*, 2012, **48**(4): 97 – 101.
- [19] 徐华东, 徐国祺, 王立海, 等. 原木横截面应力波传播时间等值线绘制及影响因素分析[J]. 林业科学, 2014, **50**(4): 95 – 100.  
XU Huadong, XU Guoqi, WANG Lihai, *et al.* Construction of stress wave time isolines on log cross section and analysis of its effect factors [J]. *Sci Silv Sin*, 2014, **50**(4): 95 – 100.
- [20] 张丽娜. AHP-模糊综合评价法在生态工业园区评价中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.  
ZHANG Lina. *Application of AHP-Fuzzy Comprehensive Evaluation in Assessment of Eco-Industrial Park* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [21] 刘瑜. 北京市古树健康外貌特征评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.  
LIU Yu. *Assessment on Ancient Trees Health on Basis of Morphological characteristics in Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [22] 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.  
LIU Yu, XU Chengyang. Research progress in ancient trees health assessment [J]. *World For Res*, 2013, **26**(1): 37 – 42.
- [23] 徐新洲, 薛建辉. 基于AHP-模糊综合评价的城市湿地公园植物景观美感评价[J]. 西北林学院学报, 2012, **27**

(2): 213 – 216.

XU Xinzhou, XUE Jianhui. Aesthetic evaluation for plant landscape of wetland park based on AHP [J]. *J Northwest For Univ*, 2012, **27**(2): 213 – 216.

- [24] 张荷霞, 刘永学, 李满春, 等. 基于 AHP 和 EWCM 的部分南沙岛礁战略价值模糊综合评价[J]. 海洋通报, 2014, **33**(4): 377 – 382.
- ZHANG Hexia, LIU Yongxue, LI Manchun, *et al.* Fuzzy comprehensive evaluation of the strategic value for several reefs in the spratly islands based on AHP and EWCM [J]. *Mari Sci Bull*, 2014, **33**(4): 377 – 382.
- [25] 张连刚, 支玲, 张静, 等. 林业专业合作组织满意度的多层次模糊综合评价[J]. 林业科学, 2014, **50**(8): 154 – 161.
- ZHANG Liangang, ZHI Ling, ZHANG Jing, *et al.* Multilayer fuzzy comprehensive evaluation of the satisfaction with forestry' specialized cooperative organization [J]. *Sci Silv Sin*, 2014, **50**(8): 154 – 161.
- [26] 朱东泽. AHP-模糊综合评价法在野生动物新发传染病风险评估中的应用: 以林蛙虹彩病毒为例[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- ZHU Dongze. *Application of AHP and Fuzzy Synthetic Evaluation in Risk Assessment of Wildlife Emerging Infectious Diseases: A Case Study of Iridovirus of Rana dybowskii* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2010.
- [27] RUTISHAUSER E, BARTHÉLÉMY D, BLANC L, *et al.* Crown fragmentation assessment in tropical trees: method, insights and perspectives [J]. *For Ecol Manage*, 2011, **261**(3): 400 – 407.
- [28] WANG Y T, YANG C Y, CHEN Y T. Characterization of senescence-associated proteases in postharvest broccoli florets [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2004, **42**(7/8): 663 – 670.
- [29] ROCA M, JAMES C, PRUZINSKA A. Analysis of the chlorophyll catabolism pathway in leaves of an introgression senescence mutant of *Lolium temulentum* [J]. *Phytochemistry*, 2004, **65**(9): 1231 – 1238.
- [30] 王晓晖. 北京古树生态监测与评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- WANG Xiaohui. *Ecological Monitoring and Assessment on the Ancient Trees in Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University. 2011.