



苏仁峰, 易敏, 张露, 等. 针叶性状与湿地松产脂能力关系[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(4): 910–918.
SU R F, YI M, ZHANG L, et al. Relationship between resin yield and needle traits of *Pinus elliottii*[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(4): 910–918.

针叶性状与湿地松产脂能力关系

苏仁峰¹, 易敏¹, 张露^{1*}, 万振和², 孙世武², 吴云燕¹,
潘俊彬¹, 文静¹, 赖猛¹, 熊启慧¹

(1. 江西农业大学 江西省森林培育重点实验室/江西特色林木资源培育与利用2011协同创新中心/林学院, 江西 南昌 330045; 2. 江西省吉安市青原区白云山林场, 江西 吉安 343000)

摘要:【目的】探讨湿地松(*Pinus elliottii*)产脂量与针叶形态特征、功能性状及气孔指标之间的关系, 旨在为完善湿地松高产脂优树的选择方法和建立高产脂林定向培育技术体系提供理论依据。【方法】以江西省吉安市白云山林场1990年春造林的湿地松种源/家系试验林为研究对象, 利用混合分群分析法将不同产脂量林木划分出高产脂、中产脂、低产脂3种类型, 测定并分析1年生针叶和2年生针叶形态、功能性状及气孔指标。【结果】除气孔总面积占叶片面积比例的变异系数为22.29%外, 其余不同产脂量林木针叶性状的变异系数均小于20%, 且变化幅度较小。对高、中、低3种产脂量林木的针叶性状的方差分析表明, 高产脂林木的针叶形态、相对含水率及气孔等性状指标大于低产脂林木性状, 而干鲜重比、叶干物质含量、比叶面积等功能指标则呈现出随产脂量升高而降低的趋势, 低产脂林木的1年生和2年生的针叶性状指标呈显著差异。相关性分析表明, 除叶干物质含量、干鲜重比及比叶面积与产脂量呈负相关外, 其余指标均为正相关, 其中针叶长、干鲜重比、气孔总面积占叶片面积比例与产脂量之间的相关性较强, 相关系数均在0.64以上。【结论】在同一立地条件下, 不同产脂量湿地松的针叶性状具有较大的内稳性, 且针叶性状与产脂量相关性强, 并且可通过针叶长、干鲜重比、气孔总面积占叶片面积比例等针叶性状指标进行高产脂优树早期辅助选择。

关键词: 湿地松; 产脂量; 针叶; 形态指标; 功能性状; 气孔

中图分类号: S791.246 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2286(2022)04-0910-09

Relationship Between Resin Yield and Needle Traits of *Pinus elliottii*

SU Renfeng¹, YI Min¹, ZHANG Lu^{1*}, WAN Zhenghe², SUN Shiwu², WU Yunyan¹,
PAN Junbin¹, WEN Jing¹, LAI Meng¹, XIONG Qihui¹

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Silviculture, 2011 Collaboration Innovation Center of Jiangxi Typical Trees Cultivation and Utilization, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Baiyunshan Forest Farm of Qingyuan District, Ji'an City, Jiangxi Province, Ji'an, Jiangxi 343000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigating the relationship between lipid yield of *Pinus elliottii* and the morphological characteristics, functional traits and stomatal indexes of the needles, thus providing theoretical basis for improving the selection method of high-yield trees and establishing the directional cultiva-

收稿日期: 2021-12-26 修回日期: 2022-02-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0600502-5)和江西省林业科技创新专项(201811)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2017YFD0600502-5) and Jiangxi Province Forestry S&T Innovation Special Program(201811)

作者简介: 苏仁峰, orcid.org/0000-0002-3199-7267, srf1369557341@163.com; *通信作者: 张露, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事林木遗传育种和森林培育研究, orcid.org/0000-0003-2168-0546, zhlu856@163.com。

tion technology system of high-yield forests. [Method] The *Pinus elliottii* provenance/family test forest was afforested in the spring of 1990 in Baiyun Mountain Tree Farm in Jiangxi as the research object. Mixed clustering analysis was used to divide trees of different lipid yields into three types: high lipid yield, middle lipid yield and low lipid yield. The morphology, functional characters and stomatal indexes of 1-year-old and 2-year-old needles were measured and analyzed. [Result] Except the ratio of stomata total area to leaf area was 22.29%, the variation coefficient of conifer traits in trees with different lipid yields was less than 20%, and the variation range was small. The variance analysis of the conifer traits of high, medium and low lipid yielding trees showed that the traits of high lipid yielding trees, such as the morphology of needles, relative water content and stomata, were higher than those of low lipid yielding trees, while the functional indexes, such as the ratio of dry to fresh weight, leaf dry matter content and specific leaf area, tended to decrease with the increase of lipid yield. There were significant differences between 1-year-old and 2-year-old coniferous leaf traits in low fat yield trees. Correlation analysis showed that, except dry matter content, dry fresh weight ratio and specific leaf area were negatively correlated with lipid yield, the other indexes were positively correlated, among which needle length, dry fresh weight ratio, stomatal total area ratio to leaf area were significantly correlated with lipid yield, and the correlation coefficients were all above 0.64. [Conclusion] Under the same site condition, the needle traits of *Pinus elliottii* with different lipid yields have greater internal stability, and there was a significant correlation between the needle traits and lipid yield. The early auxiliary selection of high-lipid trees could be implemented by taking needle length, dry/fresh weight ratio, stomata total area to leaf area ratio and other needle traits into consideration.

Keywords: *Pinus elliottii*; resin yield; needles; morphological index; functional traits; stomatal

【研究意义】湿地松(*Pinus elliottii*), 原产美国东南部, 为松科松属类常绿乔木。因其生长快、干型直、适应性强和松脂优等特点被广泛引种栽培, 是我国南方主要的脂材兼用树种之一^[1-3], 在江西有近90%的松脂是采自于湿地松^[4-6], 其采脂收益在林分总收益中占有重要比重, 因此, 湿地松产脂量的高低直接影响到松香产业的效益与发展^[7]。【前人研究进展】冷春辉^[8]发现高产脂湿地松分别是低产脂单株木质部纵向树脂道总面积和单个纵向树脂道面积的2.32倍和1.84倍。许建伟^[9]对马尾松叶长和针叶干鲜重比与松脂产量的关系研究表明, 针叶叶长和干鲜重比影响马尾松的产脂能力。安宁等^[10]对27年马尾松人工林不同产脂类型针叶形态特征差异进行了研究, 结果表明可以将1年生的针叶长度和鲜重作为高产脂优树选择的参考指标。植物功能性状反映植物对不同环境的适应性及植物内部不同功能之间的生理进程, 由此不同功能性状之间可能与湿地松的产脂存在一定的关系^[11]。张雪等^[12]认为比叶面积较小的植物通常其保持自身营养的能力较强, 从而对环境资源利用的更加充分, 进而会提高产脂量。叶干物质含量可以直接反应湿地松对环境资源的利用, 进而对湿地松松脂的产出产生影响^[13]。气孔是叶片与外界环境进行交换的主要通道, 气孔频度及面积等指标与叶片形态的化学特征存在一定的协同变异关系^[14]。气孔频度大的植物水分蒸腾散失越少, 越有利于植物水分的保持^[15], 并有利于光合作用的进行, 从而对产脂量产生影响。【本研究切入点及拟解决的关键问题】不同产脂量的湿地松在针叶性状上是否存在差异还未见报道, 本研究拟通过分析湿地松针叶形态、功能性状及气孔与产脂量之间的关系, 为高产脂湿地松早期选择提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及样品采集

试验地位于江西省吉安市青原区白云山林场, 海拔90 m, 亚热带季风气候, 年均气温18.6℃, 极端高温38.3℃, 极端低温-4.4℃, 年均降雨1 646 mm, 无霜期308 d。造林地为平坦小丘陵, 红壤, 林地植被主要是芒属(*Miscanthus*)、铁芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)等。

湿地松试验林为1990年春造林,材料来自美国佐治亚州(Georgia)种子园的12个家系、密西西比州(Mississippi)种子园的48个家系和佛罗里达州(Florida)种子园的48个家系及江西省吉安市林业科学研究所母树林中的5个混合家系,共113个家系,现保存单株1 532株。

2016年和2017年连续2年从5月1号至10月31日止,采用低频下降式采脂法每月进行采脂并称量,获得单株月产脂量及年总产脂量,并实测单株的树高和胸径。利用混合分群分析法,选择高产脂量(>9.73 kg/年)、中产脂量(5.00~6.44 kg/年)和低产脂量(<3.93 kg/年)的单株各16株,共48株(表1)。2020年8月(产脂高峰期),每株按东、西、南、北4个方向分别采取树冠中部和中上部的生长良好的1年生和2年生的两针一束新鲜针叶。

表1 不同产脂量湿地松样木概况

Tab.1 General situation of *Pinus elliottii* with different lipid yield

序号 The serial number	高产脂 High-resin-yield			中产脂 Middle-resin-yield			低产脂 Low-resin-yield		
	胸径/cm	树高/m	产脂量/kg	胸径/cm	树高/m	产脂量/kg	胸径/cm	树高/m	产脂量/kg
	Diameter	Height	Resin-yield	Diameter	Height	Resin-yield	Diameter	Height	Resin-yield
1	33.00	16.50	9.95	25.40	14.50	6.23	21.10	11.80	2.53
2	33.40	13.70	10.20	30.60	15.70	5.00	34.10	12.40	3.93
3	32.60	14.00	9.84	32.00	14.80	6.30	22.70	13.60	2.97
4	39.40	14.50	10.14	26.50	15.60	6.22	23.30	11.00	2.89
5	35.60	12.80	11.65	27.30	14.40	6.15	21.20	10.20	2.42
6	37.50	14.30	13.12	29.80	14.50	6.16	22.20	10.00	2.17
7	40.20	14.90	10.40	34.40	14.20	6.44	24.60	12.60	2.95
8	39.90	15.30	9.95	21.10	14.80	6.05	20.90	12.90	2.33
9	35.30	11.80	11.96	31.00	14.90	6.19	25.50	10.70	2.42
10	43.90	13.40	13.95	25.10	14.50	6.04	24.90	12.30	2.48
11	35.90	14.40	10.46	31.50	14.80	6.19	21.50	10.60	2.33
12	34.70	15.50	11.68	33.60	14.50	6.32	21.30	12.00	2.27
13	34.40	15.20	9.98	30.20	14.50	6.08	23.40	11.90	2.58
14	30.30	14.50	9.73	27.30	13.40	6.18	20.40	13.80	2.56
15	34.40	16.20	9.78	28.10	14.60	6.14	26.70	15.50	2.71
16	33.80	14.70	9.91	29.30	14.90	6.22	21.60	10.60	2.18
平均	35.96	14.47	10.82	28.94	14.65	6.11	23.52	12.04	2.62

1.2 针叶形态及气孔指标的测定

针叶形态指标:每株树随机选取30枚针叶用于针叶形态指标的测定。将新鲜针叶取出后,用滤纸吸干表面水分,用电子天平称其鲜重,饱和鲜重以及干重,用数显电子游标卡尺(0.01 mm)测量叶长(LL)、叶宽(DL)、叶厚(TL)、叶鞘长(FSL)、束粗(FW),并计算出单面弧长面积(SCS),从而得到叶面积(LA),并计算出比叶面积(SLA)、相对含水率(RMC)、叶干物质含量(LDMC)以及干鲜重比(R_{dfr})。

$$\text{单面弧长面积(SCS)} = (\pi \times \text{DL} \times \text{LL}) / 2 \quad (1)$$

$$\text{叶面积(LA)} = \text{SCS} + \text{DL} \times \text{LL} \quad (2)$$

$$\text{比叶面积(SLA)} = \text{LA} / \text{叶干重} \quad (3)$$

$$\text{相对含水率} = (\text{针叶鲜重} - \text{针叶干重}) / (\text{针叶饱和鲜重} - \text{针叶干重}) \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{叶干物质含量[LDMC, 公式中记为 } w(\text{LDMC})] w(\text{LDMC}) = \text{针叶烘干重} / \text{针叶饱和鲜重} \quad (5)$$

$$\text{干鲜重比}(R_{\text{dfr}}) = \text{针叶烘干重} / \text{针叶鲜重} \quad (6)$$

气孔指标:每株树选取生长良好的1年生、2年生针叶各3束,每束针叶取新鲜针叶中间部位用指甲油印迹法制作针叶表皮切片,每个切片均匀选取3个视野在尼康显微镜20倍下通过NIS-Element软件观察气孔频度(SF)、气孔直径(PD)、气孔面积(SA)、气孔总面积占叶片面积比例(SP),取平均值。

1.3 数据处理

采用Excel 2016 软件对数据进行统计分析,运用SPSS 21.0 软件对数据进行描述统计、单因素方差分析及 Pearson 相关性分析,并运用Origin 2018 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同产脂量湿地松针叶性状变异系数

对高、中、低等 3 个产脂量的湿地松林木进行针叶性状测定表明,各性状间均存在一定程度的变异(表 2),除气孔总面积占叶片面积比例变异系数为 22.29% 外,其他性状变异系数均小于 20%,其中叶厚在不同产脂量之间的变异系数最大,为 17.80%,变化幅度为 11.56%~27.35%;其次为气孔面积,变异系数为 16.91%,变化幅度为 9.81%~24.33%。变异系数最小的是叶长,仅仅只有 8.37%,其变化幅度为 6.58%~9.99%,波动极小。

表 2 不同产脂量湿地松叶片性状描述性统计分析

Tab.2 Descriptive statistical analysis of leaf traits of *Pinus elliottii* with different resin yield

叶片性状指标 Leaf trait index	高产脂 High-resin-yield	中产脂 Middle-resin-yield	低产脂 Low-resin-yield	平均值 The average	标准偏差 The standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
叶长(LL)/mm	208.631 0	194.859 0	182.256 0	195.249 0	16.349 7	8.37
叶宽(DL)/mm	1.418 0	1.415 0	1.391 0	1.408 0	0.127 8	9.08
叶厚(TL)/mm	0.729 0	0.733 0	0.594 0	0.685 5	0.122 0	17.80
叶鞘长(FSL)/mm	15.297 0	14.028 0	14.316 0	14.546 9	1.589 7	10.93
束粗(FW)/mm	1.683 0	1.740 0	1.595 0	1.672 4	0.201 3	12.04
叶面积(LA)/mm ²	761.238 0	708.163 0	653.361 0	707.587 4	93.054 5	13.15
比叶面积(SLA)/mm ²	122.859 0	119.801 0	138.126 0	126.928 9	19.721 9	15.54
叶干物质含量(LDMC)/%	35.50	41.00	29.00	38.82	3.83	9.87
相对含水率(RMC)/%	72.80	69.90	56.50	66.41	9.56	14.40
干鲜重比(R_{df})/%	43.10	50.00	54.10	49.07	5.57	11.35
气孔频度(SF)/(个·mm ⁻²)	73.736 0	68.212 0	65.031 0	68.992 6	9.517 1	13.79
气孔面积(SA)/μm ²	515.274 0	444.568 0	405.100 0	454.980 5	76.924 6	16.91
气孔直径(PD)/μm	24.964 0	22.908 0	22.080 0	23.306 9	2.082 3	8.94
气孔总面积占 叶片面积比例(SP)/%	3.80	3.00	2.60	3.14	0.70	22.29

2.2 不同产脂量湿地松针叶形态变化

不同产脂量和不同叶龄的针叶形态存在一定差异(表 3)。1 年生叶长、叶宽、叶厚、叶面积等针叶性状随着产脂量增大而增大,中产脂林木针叶束粗最大,而叶鞘长最短。总体来说,高产脂林木针叶形态指标均大于低产脂林木,且高产脂与低产脂湿地松在叶长、叶厚、束粗、叶面积中均达显著差异($P<0.05$)。

2 年生叶长及叶面积随着产脂量的增大而增大,且在高低产脂量间均表现出显著的差异性($P<0.05$)。而中产脂林木的叶厚、叶宽与束粗最大,且叶厚在高低产脂量间存在显著关系($P<0.05$)。叶鞘长则呈现出高产脂,低产脂,中产脂的由高到低趋势,且在高低产脂量间存在显著关系($P<0.05$),总体来说,除叶宽外,2 年生针叶各形态指标呈现为高产脂大于低产脂。

对不同年份针叶进行分析,除各个产脂量的叶鞘长,高产脂的叶宽、叶厚、叶面积及中产脂的叶长、叶厚呈现出 2 年生小于 1 年生之外,其余均呈现出 2 年生大于 1 年生的趋势。其中除低产脂的叶长、叶面积及高中低产脂量的叶鞘长的 1 年生、2 年生针叶之间有显著差异外($P<0.05$),其余各个针叶形态指标的 1 年生与 2 年生针叶之间的差异不显著。

表3 不同产脂量林木的1年生、2年生针叶形态性状方差分析
Tab.3 Variance analysis of morphological characters of 1-year-old and 2-year-old
coniferous trees with different resin yield

形态指标	针叶类型	高产脂	中产脂	低产脂
Morphological index	Needle type	High-resin-yield	Middle-resin-yield	Low-resin-yield
叶长(LL)/mm	1年生	207.018 8±3.221 5 ^{Aa}	195.018 8±3.510 3 ^{Ab}	175.825 0±2.194 7 ^{Bc}
	2年生	210.243 8±2.444 3 ^{Aa}	194.700 0±4.008 1 ^{Ab}	188.687 5±1.995 9 ^{Ab}
叶宽(DL)/mm	1年生	1.441 4±0.025 8 ^{Aa}	1.384 9±0.022 5 ^{Aa}	1.364 4±0.039 1 ^{Aa}
	2年生	1.394 9±0.040 0 ^{Aa}	1.444 1±0.023 7 ^{Aa}	1.418 3±0.035 5 ^{Aa}
叶厚(TL)/mm	1年生	0.732 4±0.018 2 ^{Aa}	0.725 4±0.017 3 ^{Aa}	0.578 1±0.125 3 ^{Ab}
	2年生	0.726 5±0.025 3 ^{Aa}	0.739 8±0.031 7 ^{Aa}	0.610 6±0.030 5 ^{Ab}
束粗(FW)/mm	1年生	1.635 6±0.056 3 ^{Aa}	1.721 9±0.025 3 ^{Ab}	1.153 8±0.049 9 ^{Ab}
	2年生	1.730 0±0.066 2 ^{Aa}	1.757 5±0.038 2 ^{Aa}	1.605 6±0.046 0 ^{Aa}
叶鞘长(FSL)/mm	1年生	16.125 0±0.339 9 ^{Aa}	15.131 3±0.446 9 ^{Aa}	15.275 0±0.176 9 ^{Aa}
	2年生	14.468 8±0.312 2 ^{Ba}	12.925 0±0.167 2 ^{Bb}	13.356 3±0.184 2 ^{Bb}
叶面积(LA)/mm ²	1年生	767.720 7±19.740 2 ^{Aa}	694.522 9±17.409 5 ^{Ab}	618.962 4±23.800 3 ^{Bc}
	2年生	754.755 7±24.805 7 ^{Aa}	721.802 8±15.806 2 ^{Aab}	687.760 1±18.415 1 ^{Ab}

小写字母表示不同产脂量类型下形态指标的差异性,大写字母表示同一产脂量下1年生、2年生针叶之间形态指标的
差异性,相同的字母表示无显著性差异($P<0.05$)。
Lowercase letters represent the difference of morphological indexes under different types of resin yield, and uppercase letters
represent the difference of morphological indexes among the conifers of 1-year-old and 2-year-old under the same resin yield.

2.3 不同产脂量湿地松针叶功能性状变化

不同产脂量湿地松针叶功能性状变化呈现一定规律性(图1)。随着产脂量的降低其针叶相对含水率
也下降,不同产脂量含水量达显著差异($P<0.05$);而针叶比叶面积、干物质含量和干鲜重比随着产脂量下
降呈现升高的趋势,并达显著差异($P<0.05$);除比叶面积外,1年生、2年生针叶功能性状差异均不显著。

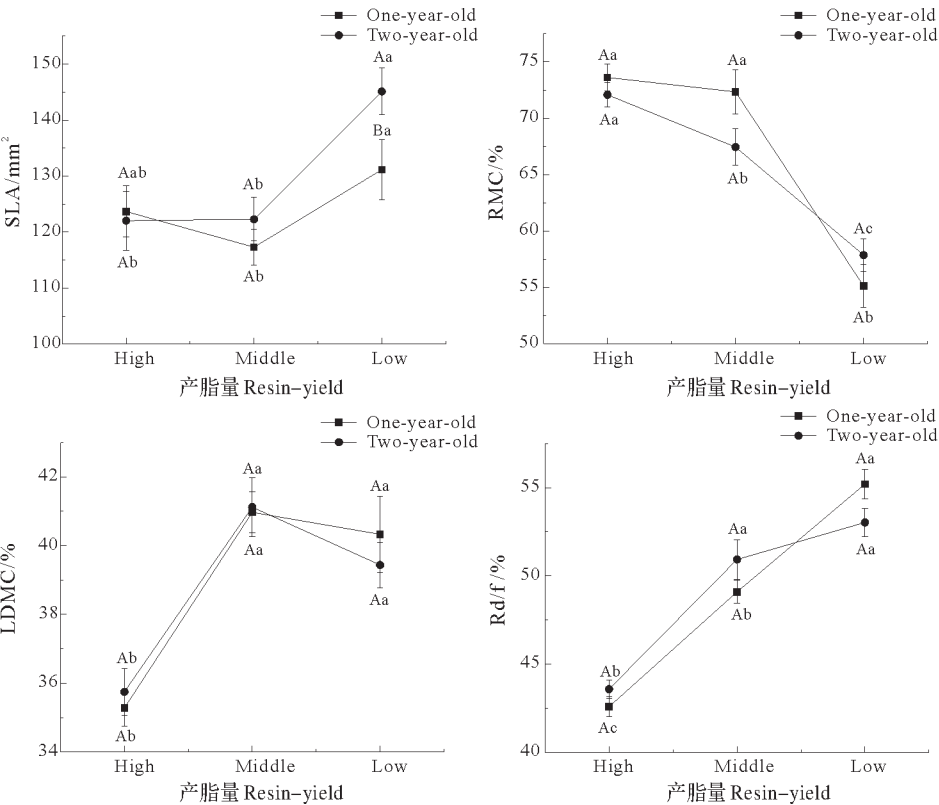


图1 不同产脂量林木的1年生、2年生针叶功能性状分析
Fig. 1 Analysis of functional traits of 1-year-old and 2-year-old coniferous trees with different resin yield

2.4 不同产脂量湿地松针叶气孔变化

对不同产脂量下湿地松针叶气孔性状进行分析表明,1年生和2年生的针叶气孔直径、气孔频度、气孔面积、气孔总面积占叶片面积比例基本上均随着产脂量增大而增大(图2),且达显著差异($P<0.05$);除高产脂林木的1年生针叶气孔频度大于2年生针叶外,不同产脂量林木的2年生针叶气孔性状均大于1年生针叶;低产脂林木的1年生和2年生的针叶气孔直径、气孔频度、气孔面积、气孔总面积占叶片面积比例之间存在显著关系($P<0.05$)。

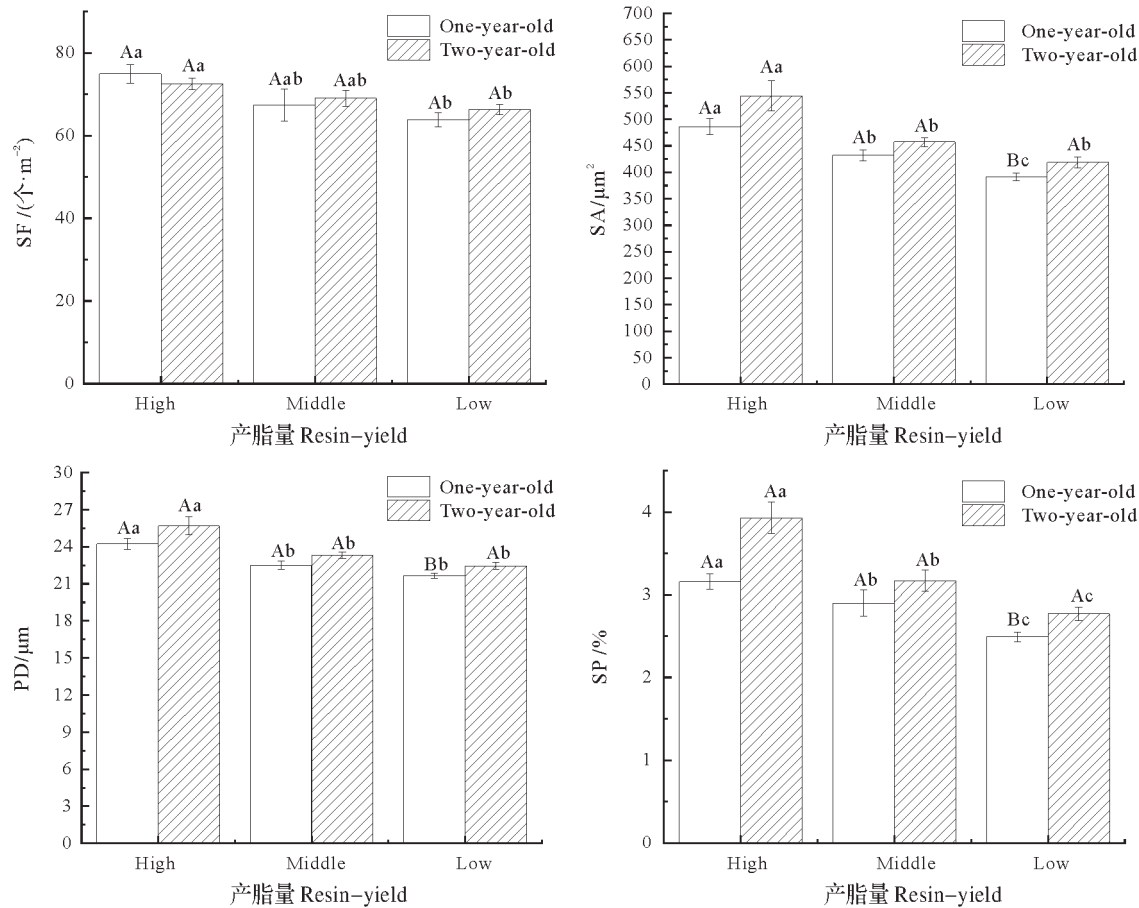
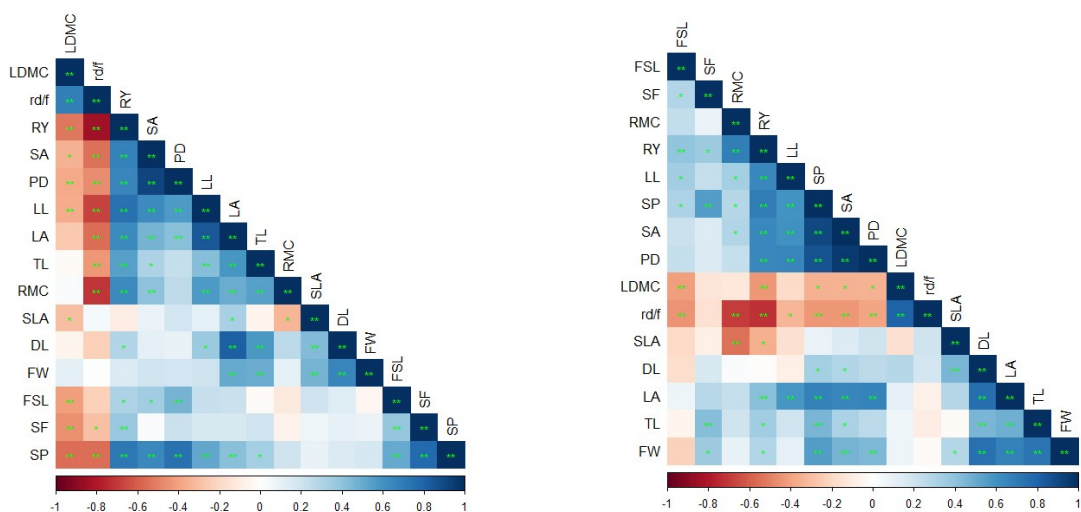


图2 不同产脂量林木1年生、2年生针叶气孔性状分析

Fig. 2 Analysis on stomatal characters of 1-year-old and 2-year-old coniferous trees with different lipid yield

2.5 针叶性状与产脂量的相关性

研究湿地松产脂量与针叶性状之间的相关性分析结果表明(图3),1年生针叶叶长、叶厚、叶面积、相对含水率、气孔频度、气孔面积、气孔总面积占叶片面积比例、气孔直径与产脂量之间均存在极显著的正相关关系,叶宽、叶鞘长与产脂量存在显著的正相关关系。叶干物质含量、干鲜重比与产脂量均存在极显著的负相关关系。其中干鲜重比与年产脂量之间的相关性最强,相关系数为-0.850,其次是叶长与产脂量,相关系数为0.741,再者气孔总面积占叶片面积比例与产脂量,相关系数为0.714。而1年生束粗及1年生比叶面积与产脂量之间没有显示其相关性。2年生针叶叶长、叶鞘长、叶面积、相对含水率、气孔面积、气孔总面积占叶片面积比例、气孔直径与产脂量之间均存在极显著的正相关关系,2年生叶厚、束粗及气孔频度与产脂量之间均存在显著的正相关关系。叶干物质含量、干鲜重比则与产脂量均存在极显著的负相关关系,比叶面积与产脂量则存在显著的负相关关系,而2年生叶宽与年产脂量之间没有显示其相关关系。按与产脂量的相关程度由大到小排列依次为:干鲜重比,气孔总面积占叶片面积比例,相对含水率,叶长及气孔直径,气孔面积,叶干物质含量,叶鞘长,气孔频度和叶厚,相关系数分别为-0.725,0.693,0.683,0.649,0.646,-0.430,0.400,0.354,0.344。



左图为1年生针叶,右图为2年生针叶,RY为产脂量。

The left picture shows 1-year-old needles and the right picture shows 2-year-old needles, RY is the amount of resin yield.

图3 湿地松针叶性状与产脂量相关性分析

Fig.3 Correlation analysis between needle traits and lipid yield of *Pinus elliottii*

3 结论与讨论

植物的生长发育离不开光合作用,光合作用是决定产脂能力高低的重要生理过程^[16],同时叶片既是与环境接触面积最大,且对环境的改变最为敏感的器官,又是植物进行光合作用的主要器官^[17]。因此,湿地松针叶形态特征对其产脂量必然有着影响。本研究通过对湿地松针叶性状指标分析,发现在不同产脂量下各针叶性状指标的变异系数在2.23%~17.80%,均不超过20%,属于较弱变异,说明在同一生长环境中,湿地松针叶对外界的适应能力相对稳定,各针叶性状有较大的内稳性^[18]。此外,不同产脂量林木针叶形态存在显著差异,其中除2年生针叶宽外,其他形态指标与产脂量之间均呈现出高产脂大于低产脂的关系,并且在叶长、叶厚、束粗、2年生的叶鞘长、叶面积中表现出显著的差异性($P<0.05$),这可能是因为叶长和叶面积是影响植株光合作用面积的主要因素,其越大则有利于植株捕捉光资源,继而增强植株的产脂力。此结果与安宁^[10]对马尾松的研究结果基本吻合。基本上为2年生大于1年生,而叶鞘长则为1年生大于2年生,这可能是与针叶的形成过程有关,针叶是从叶鞘中长出,随着针叶的生长,叶鞘逐渐脱落变短。

研究表明随着产脂量的增大,除相对含水率外,比叶面积、叶干物质含量和干鲜重比均有不同程度的减小,并均存在显著差异。比叶面积较小的植物对体内水分和养分等资源的保持能力较强,从而对环境资源利用的更加充分^[19]。而叶干物质含量低的物种,通常与丰产的、干扰强度高的环境相关^[20],植株叶片干物质含量越低,说明其储存的水分越足,代谢就越旺盛,进行光合作用的能力就越强,从而对产脂量产生影响。王雪艳^[21]研究发现叶干物质含量与叶面积呈负相关,Abe等^[22]指出比叶面积与叶面积呈负相关关系,这与本文结论相一致。本研究中,湿地松高产脂干鲜重比显著小于低产脂干鲜重比,这是因为干鲜重比直接反应束缚水/自由水的比值,可以作为植物新陈代谢活动的重要生理指标,当干鲜重比的比值越低时,细胞原生质越接近溶胶的状态,从而植物的新陈代谢越旺盛,进而影响湿地松产脂能力^[23]。

叶片气孔是植物表皮的特殊结构^[24],是叶片与外界环境进行气体、水分交换的主要通道,是植物叶片进行光合、呼吸作用以及蒸腾作用的重要结构,其开度变化对植物水分状况及同化有着重要影响^[25-26]。气孔频度、面积、直径、气孔总面积占叶片面积比例等因植物和环境而异。一般来说,影响松类产脂的因素很多,但大多数观点都认为产脂与松类针叶光合作用有关^[27]。本研究发现,气孔各指标在不同产脂量间均表现为高产脂大于低产脂,且基本上为2年生针叶大于1年生针叶。在同样的视野观察下,气孔频度越大即代表气孔数量越多,面积与直径越大则代表张开的程度越大,继而会导致气孔总面积占叶片面积的比例越大,说明植物进行光合作用越强,从而产脂能力越强。

本研究结果显示,1年生针叶叶长、叶宽、叶厚、叶鞘长、叶面积、相对含水率、叶干物质含量、干鲜重比、气孔频度、气孔面积、气孔直径、气孔总面积占叶片面积比例与产脂量之间均存在着显著的相关关系。其中干鲜重比、叶长和气孔总面积占叶片面积比例与产脂量的相关性较强,相关系数分别为-0.850,0.741,0.714。而2年生针叶叶长、叶厚、叶鞘长、束粗、叶面积、比叶面积、相对含水率、叶干物质含量、干鲜重比、气孔频度、气孔面积、气孔直径、气孔总面积占叶片面积比例与产脂量之间均存在显著的相关关系。其中干鲜重比、气孔总面积占叶片面积比例、相对含水率、叶长与产脂量的相关性较强,相关系数分别为-0.725,0.693,0.683,0.649。综上所述,叶长、干鲜重比、气孔总面积占叶片面积比例与产脂量之间的相关性较强。原因可能为叶长是影响叶片表面积的最主要因素,叶长越长,叶表面积越大,从而植株进行光合作用的面积也越大,进而使得湿地松的产脂量也越大。干鲜重比是用来说明植物的新陈代谢的重要指标,干鲜重比越小,说明植物新陈代谢的越旺盛,从而产脂也越高。同时气孔总面积占叶片面积比例对植物的光合有着重要的调节作用,比值越大,植株与外界环境进行气体交换的通道就越大,使植株能更加有效的进行光合作用,进而影响湿地松的产脂量。

参考文献 References:

- [1] 吴际友,陈明皋,刘球,等.美国湿地松三代种子园半同胞与全同胞家系苗期生长表现[J].中南林业科技大学学报,2016,36(6):1-5.
WU J Y, CHEN M G, LIU Q, et al. Seedling growth among half-sib full-sib families of *Pinus elliottii* [J]. Journal of central south university of forestry & technology, 2016, 36(6): 1-5.
- [2] 易敏,张露,赖猛,等.湿地松转录组 SSR 分析及 EST-SSR 标记开发[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(2):75-83.
YI M, ZHANG L, LAI M, et al. Analysis of SSR information in transcriptome and development of EST-SSR molecular markers in *Pinus elliottii* Engelm [J]. Journal of Nanjing forestry university (natural sciences edition), 2020, 44(2): 75-83.
- [3] 程子珊,易敏,张露,等.湿地松体细胞胚胎发生胚性愈伤组织诱导条件优化[J].江西农业大学学报,2021,43(5):1054-1064.
CHENG Z S, YI M, ZHANG L, et al. Optimization of embryogenic callus induction conditions for somatic embryogenesis of *Pinus elliottii* [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(5): 1054-1064.
- [4] LAI M, ZHANG L, YI M, et al. Inheritance of resin yield and main resin components in *Pinus elliottii* Engelm. at three locations in southern China [J]. Industrial crops & products, 2020, 144(C):
[5] 蒲莹,张敏,夏朝宗.我国松脂资源状况及保护发展对策[J].林业资源管理,2012,38(3):41-44.
PU Y, ZHANG M, XIA C Z. Current situation of rosin resources in China and corresponding protection and development measures [J]. Forest resources management, 2012, 38(3): 41-44.
- [6] 庄伟瑛,张玉英,邹元熹.高产脂湿地松选择和相关因子的分析[J].江西农业大学学报,2007(1):147-150.
ZHUANG W Y, ZHANG Y Y, ZHOU Y X. Selection for high-resin yield of slash pine and analysis of factors concerned [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2007(1): 147-150.
- [7] 张樟德.中国松香工业的现状与发展对策[J].北京林业大学学报,2008(3):147-152.
ZHANG Z D. Present situation and development policies of rosin industry in China [J]. Journal of Beijing forestry university, 2008(3): 147-152.
- [8] 冷春晖.湿地松产脂量与生长、树脂道及松节油的相关性研究[D].南昌:江西农业大学,2019.
LENG C H. A study on the correlation between resin yield and growth, resin channel and turpentine of *Pinus elliottii* [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2019.
- [9] 许建伟.叶长与针叶干鲜重比对马尾松产脂能力的影响[J].农学学报,2019,9(2):54-58.
XU J W. Leaf length and ratio of dry weight: effect on resin production capacity of *Pinus massoniana* [J]. Journal of agriculture, 2019, 9(2): 54-58.
- [10] 安宁,李洪果,赵总,等.马尾松产脂量与针叶形态特征的关系[J].西北林学院学报,2020,35(1):108-111.
AN N, LI H G, ZHAO Z, et al. Relationship between the resin yield and needle morphology characteristics of *Pinus massoniana* [J]. Journal of northwest forestry university, 2020, 35(1): 108-111.
- [11] DIAZ S, HODGSON J G, THOMPSON K, et al. The Plant traits that drive ecosystems: evidence from three continents [J]. Journal of vegetation science, 2004, 15: 295-304.

- [12] 张雪,钟全林,余华,等.翅荚木同龄林林木叶片性状与胸径生长关系[J].林业科学,2020,56(5):168-175.
ZHANG X,ZHONG Q L,YU H,et al.Relationship between the leaf functional traits and the diameter growth in even-aged stands of *Zenia insignis*[J].Scientia silvae Sinicae,2020,56(5):168-175.
- [13] 胡耀升.长白山森林不同演替阶段植物功能性状及其影响因子的研究[D].北京:北京林业大学,2014.
HU Y S.Plant functional traits and their impacting factors for the different succession stages in Changbai Mountains[D].Beijing:Beijing Forestry University,2014.
- [14] 王瑞丽,于贵瑞,徐志伟,等.气孔特征与叶片功能性状之间关联性沿海拔梯度的变化规律:以长白山为例[J].生态学报,2016,36(8):2175-2184.
WANG R L,YU G R,XU Z W,et al.Altitudinal variation in the covariation of stomatal traits with leaf functional traits in Changbai Mountain[J].Acta ecologica Sinica,2016,36(8):2175-2184.
- [15] 田岳梨.秦岭山脊油松针叶功能性状特征及其对土壤和海拔的响应[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
TIAN Y L.Feature of needle functional traits of *Pinus tabulaeformis* and their response to soil and altitude in Qinling Mountains[D].Yangling:Northwest Agriculture & Forestry University,2021.
- [16] 杨章旗.马尾松材性与产脂性状遗传改良研究[D].北京:北京林业大学,2012.
YANG Z Q.Genetic improvement of key wood and resin properties of *Pinus Massoniana Lamb*[D].Beijing:Beijing Forestry University,2012.
- [17] 李青粉,王军辉,安三平,等.丽江云杉天然种群针叶功能性状及其随海拔的变异[J].林业科学研究,2013,26(6):781-785.
LI Q F,WANG J H,AN S P,et al.Altitudinal variation of needle functional traits in natural population of *Picea likiangensis* [J].Forest research,2013,26(6):781-785.
- [18] 贾婷,宋武云,张露,等.湿地松针叶功能性状及其对磷添加的响应[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(6):65-71.
JIA T,SONG W Y,ZHANG L,et al.Responses of needle functional traits of *Pinus elliottii* to phosphorus addition[J].Journal of nanjing forestry university(natural sciences edition),2021,45(6):65-71.
- [19] 张剑,包雅兰,宿力,等.敦煌阳关湿地芦苇叶性状对土壤水分的响应[J].生态学报,2019,39(20):7670-7678.
ZHANG J,BAO Y L,SU L,et al.Response of phragmites *australis* leaf traits to soil moisture in Yangguan wetland, Dunhuang[J].Acta ecologica Sinica,2019,39(20):7670-7678.
- [20] CORNELISSEN J,LAVOREL S,GARNIER E,et al.A handbook of protocols for standardized and easy measurement of plant functional traits worldwide[J].Australian journal of botany,2003,51(4):335-380.
- [21] 王雪艳,曹建军,张小芳,等.地形因子对黄土高原山杏叶片功能性状的影响[J].应用生态学报,2019,30(8):2591-2599.
WANG Y M,CAO J J,ZHANG X F,et al.Effects of topographic factors on leaf traits of apricot in the Loess Plateau, Northwest China[J].Chinese journal of applied ecology,2019,30(8):2591-2599.
- [22] ABE N,MIATTO R C,BATALHA M A.Relationships among functional traits define primary strategies in woody species of the Brazilian "cerrado"[J].Brazilian journal of botany,2018,41(2):351-360.
- [23] 张诚诚.基质含水量对油茶容器苗生长和生理特性的影响[D].合肥:安徽农业大学,2013.
ZHANG C C.Effects of substrate water on the growth and physiological characteristics of *Camellia oleifera* container seedlings[D].Hefei:Anhui Agricultural University,2013.
- [24] 胡潇予,于海燕,崔艺凡,等.不同种源文冠果叶片气孔分布特征对水分胁迫的响应[J].林业科学研究,2019,32(1):169-174.
HU X Y,YU H Y,CUI Y F,et al.Influence of water stress on leaves stomatal distribution characteristics of yellow horn[J].Forest research,2019,32(1):169-174.
- [25] SINCLAIR T R,ZWIENIECKI M A,HOLBROOK N M.Low leaf hydraulic conductance associated with drought tolerance in soybean[J].Physiologia plantarum,2008,132(4):446-451.
- [26] SACK L,SCOFFONI C.Leaf venation: structure, function, development, evolution, ecology and applications in the past, present and future[J].New phytologist,2013,198(4):983-1000.
- [27] 舒文波,杨章旗.马尾松不同采脂年龄和径级产脂量变化特点研究[J].中南林业科技大学学报,2011,31(11):39-43.
SHU W B,YANG Z Q.Changing law of *Pinus massoniana* with different resin tapping age and diameter[J].Journal of central south university of forestry & technology,2011,31(11):39-43.