

## 马尾松人工林林龄对土壤和叶片养分含量的影响

李 鹏<sup>1,2,3</sup>, 零天旺<sup>4</sup>, 杨章旗<sup>1,2,3\*</sup>, 陈 虎<sup>1,2,3</sup>, 颜培栋<sup>1,2,3</sup>, 陆绍浩<sup>4</sup>

(1. 广西林业科学研究院, 广西 南宁 530002; 2. 国家林业和草原局 马尾松工程技术研究中心, 广西 南宁 530002;  
3. 广西马尾松工程技术研究中心, 广西 南宁 530002; 4. 广西横县镇龙林场, 广西 横县 530327)

**摘 要:**探索不同林龄马尾松人工林土壤和针叶养分特征及其相关性,为马尾松人工林高效培育提供理论参考。采用时空互代法,以桂中不同林龄(4、9、15、19、22、30、56 a)马尾松人工林为对象,利用冗余分析和结构方程探讨马尾松人工林林龄对土壤和针叶养分含量的影响。结果表明,林龄对土壤和叶片养分均具有显著影响,随林龄的增加土壤 pH 呈先增后减趋势,中龄林中最大,有机碳、全 N、全 P、碱解 N 和速效态 K、Ca、Mg、Zn 和 B 含量呈先减后增的 U 形变化,中龄—成熟林阶段最小,全 K 和有效 P 含量呈 W 形变化;针叶养分含量随林龄增加呈波动性变化,C、N、P 和 K 含量在过熟林中最大,Ca、Zn 分别在中龄林、成熟林中含量最大,Mg 和 B 均在幼龄林中最大。针叶 K、Ca、Mg、Zn 和 B 与土壤对应元素呈显著正相关,土壤有机碳、全 N、有效 P 和速效 K 是影响马尾松叶片养分含量变化的敏感因素,土壤速效元素对叶片养分的正向效应显著,而土壤有机碳和全量养分的负向效应显著。综上,不同林龄阶段马尾松土壤和叶片养分存在显著差异,在马尾松 15 a 后,土壤和叶片养分均有所下降,尤其是受 N 素和微量元素限制,为此在马尾松中龄林后,建议施用 N 肥满足其健康生长,并辅以适量微量元素,以增强植物光合作用和蛋白质的合成及抗逆性。

**关键词:**马尾松人工林;土壤化学性质;叶片养分;结构方程模型

中图分类号:S714.8

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)05-0009-08

### Responses of Soil and Leaf Nutrients to Different Stand Ages in *Pinus massoniana* Plantation

LI Peng<sup>1,2,3</sup>, LING Tian-wang<sup>4</sup>, YANG Zhang-qi<sup>1,2,3\*</sup>, CHEN Hu<sup>1,2,3</sup>, YAN Pei-dong<sup>1,2,3</sup>, LU Shao-hao<sup>4</sup>

(1. Guangxi Forestry Research Institute, Nanning 530002, Guangxi, China; 2. Masson Pine Engineering Technology Research Center, National Administration of Forestry and Grassland, Nanning 530002, Guangxi, China; 3. Guangxi Masson Pine Engineering Technology Research Center, Nanning 530002, Guangxi, China; 4. Zhenlong Forest Farm of Hengxian County, Hengxian 530327, Guangxi, China)

**Abstract:** The objectives of this study were to explore the characteristics and correlations of soil and leaf nutrients of *Pinus massoniana* plantations with different ages, and to provide theoretical references for the efficient cultivation of *P. massoniana* plantations. Taking the *P. massoniana* plantations with different ages (4-, 9-, 15-, 19-, 22-, 30-, and 56-year-old) in Guangxi as the research objects, redundancy analysis and structural equation were used to explore the influence of forest age on soil and leaf nutrients. The results showed that forest age had a significant effect on soil and leaf nutrients. Among them, with the increase of forest age, soil pH increased first and then decreased, the maximum value of pH was found in the middle-aged plantations. The contents of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, alkali-hydrolyzable N and available potassium, calcium, magnesium, zinc, and boron decreased first and then increased with U-

收稿日期:2021-08-24 修回日期:2021-10-26

基金项目:广西科技基地和人才专项(桂科 AD19254004);八桂学者专项(2019A26);国家十三五重点研发计划项目(2017YFD060030202);广西创新驱动专项(AA17204087-1, AA17204087-4)。

第一作者:李 鹏。研究方向:森林土壤和水土保持。E-mail:1055122499@qq.com

\*通信作者:杨章旗,博士,教授级高级工程师。研究方向:林木遗传育种。E-mail:Yangzhangqi@163.com

shaped curves, and the minimum values were found in middle-aged-mature plantations. The contents of total potassium and available phosphorus showed W-shaped curves. The nutrient contents in the needles fluctuated with age, the contents of carbon, nitrogen, phosphorus and potassium were the largest in overmature plantations, calcium and zinc were the largest in middle-aged and mature plantations, respectively, and magnesium and boron were the largest in young plantations. Leaf potassium, calcium, magnesium, zinc, and boron were significantly and positively correlated with the corresponding elements in the soil. Soil organic carbon, total nitrogen, available phosphorus and available potassium were sensitive factors that affected the changes on leaf nutrients of *P. massoniana*. Soil available elements had significantly positive effects on leaf nutrients, while soil organic carbon and total nutrients had significantly negative effects. In summary, there are significant differences in the soil and leaf nutrients among different forest ages. After planting 15 years, the soil and leaf nutrients of *P. massoniana* declined, especially due to the limitation of nitrogen and trace elements. For middle-aged *P. massoniana* plantation, it was recommended to apply nitrogen fertilizer to satisfy its healthy growth, supplemented with appropriate amount of trace elements to enhance plant photosynthesis and protein synthesis and stress resistance.

**Key words:** *Pinus massoniana* plantation; soil chemical property; leaf nutrient; structural equation model

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国南方亚热带地区分布最广、资源最多的针叶林类型,具有速生、丰产、适生性强、用途广等优良特性,是我国主要工业用材树种之一,已成为南方造林的先锋树种<sup>[1]</sup>。土壤是林木赖以生长的物质基础,土壤理化性质直接影响土壤固肥和供肥能力<sup>[2-3]</sup>。叶片养分则反映土壤养分供应能力和植物树体养分利用效率,依靠叶片进行养分诊断常被应用于农林生态系统<sup>[4-5]</sup>。林龄对人工林土壤化学性质<sup>[6-7]</sup>和植物养分<sup>[8]</sup>含量均具有显著性影响。许森平等<sup>[9]</sup>研究表明,植物和土壤的养分随林龄增长发生显著变化,且土壤养分有效性的变化负向驱动养分重吸收效率。王海伦<sup>[10]</sup>通过对杉木研究发现,随林龄增加土壤有机质和全 N 的含量均有所增加,而全 K、全 P、全 Ca、全 Mg 及有效 P 含量有所下降,叶片中 C、N 和 P 含量显著增加。此外,植物养分受土壤理化性质的驱动,植物所需要吸收利用的养分元素以土壤的养分元素为主要来源,两者之间必然存在明显交互作用。土壤—植物之间交互作用作为林木生长的重要反馈机制,在生态系统的养分循环中起着关键作用<sup>[11]</sup>。曹胜等<sup>[12]</sup>研究表明,土壤养分含量的高低对叶片中其他养分含量存在显著影响。H. S. Choi *et al*<sup>[13]</sup>研究表明,土壤与树木养分之间存在着强相互作用。因此研究马尾松人工林林龄对土壤和叶片养分含量的影响及其相关性,对马尾松人工林可持续发展具有重大意义。目前关于马尾松土壤或树体养分研究大多集中在特定树龄下马尾松人工林土壤与叶片养分含量<sup>[14]</sup>,或仅研究林龄对土壤或植物养分的直接影响<sup>[15]</sup>。本研究以桂中 4、9、15、19、22、30、56 年生马尾松人工林为对象,以空间代替时间方法来分析马

尾松针叶和土壤养分的差异,利用冗余分析和结构方程模型探讨不同林龄马尾松人工林土壤和叶片养分含量的演变特征及其相关性,旨在揭示林龄对土壤和叶片养分含量的影响规律,以期提高不同林龄阶段马尾松人工林的精细化管理措施,为马尾松人工林高效培育技术提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广西横县镇龙林场(109°08′36″—109°19′15″E, 23°02′53″—23°08′24″N)。属南亚热带季风气候,年均降水量 1 477.85 mm,年均气温 21.4℃,极端低温-1℃,极端高温 39.2℃,年均日照时数 1 758.6 h,无霜期 312 d。属南方典型低山丘陵区,地势由西向东倾斜。试验林位于大吾分场,土壤为紫色砂页岩发育而成的赤红壤,平均土层厚 50 cm,林下灌草主要有山鸡椒(*Litsea cubeba*)、华南毛柃(*Eurya ciliata*)、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、山乌桕(*Sapium discolor*)、三叉苦(*Euodia lepta*)、鸭脚木(*Schefflera octophylla*)、黄毛榕(*Ficus esquiroliana*)、大青(*Clerodendrum cyrtophyllum*)、棕叶芦(*Thysanolaena maxima*)、乌毛蕨(*Blechnum orientale*)和五节芒(*Miscanthus floridulus*)等。

### 1.2 样地设置

采用空间代替时间方法,选择坡度、坡向、海拔、土壤和地形等立地因子相同或相似的不同林龄阶段马尾松人工林试验样地,分别为:幼龄林(4、9 a)、中龄林(15 a)、近熟林(19 a)、成熟林(22、30 a)和过熟林(56 a),共 7 种林龄类型,简称为:4、9、15、19、22、

30、56 a,在每个林龄分上、中和下坡设置 3 块 20 m × 20 m 的标准地(即 3 个重复),共 21 块标准地,对样地内林木进行逐一定牌、编号,测定胸径、树高等生长指标,并调查、记录样地的地形地貌、土壤类型、

群落结构及林下植被状况。试验林经炼山整地后,于次年 3 月定植,定后前 2 年每年进行 2 次砍草抚育,其后采用近自然经营措施。样地基本概况见表 1。

表 1 不同林龄阶段马尾松人工林样地基本概况

Table 1 Basic overviews of the plantation of *P. massoniana* in different stages of forest age

林龄/a	经纬度	坡度/(°)	坡向	海拔/m	密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	平均胸径/cm	平均树高/m
4	109°19′43.89″E,23°3′0.84″N	21	西南	374	1 968	8.10±0.67	5.19±1.13
9	109°19′58.58″E,23°3′12.69″N	22	南	422	1 899	14.93±0.47	9.90±1.14
15	109°16′22.34″E,23°3′25.14″N	22	东南	301	1 500	16.55±1.25	14.05±0.76
19	109°14′31.33″E,23°6′42.32″N	20	西	298	1 321	20.40±1.19	18.27±1.29
22	109°9′36.87″E,23°3′11.79″N	22	南	312	1 124	23.40±1.34	22.27±1.02
30	109°9′33.1″E,23°2′27.29″N	18	南	355	925	32.92±1.23	28.49±1.38
56	109°9′22.14″E,23°3′14.28″N	27	东南	332	732	43.64±1.19	34.65±1.07

1.3 样品的采集

1.3.1 土壤样品的采集 2019 年 3 月中旬,在每块标准样地内按“S”形布设 5 个代表性样点采集土壤样品,土钻法采集 0~40 cm 的土壤样品,并将其混合均匀,然后利用四分法取其中 1 份约 500 g 去除根和石子的新鲜土,自然风干后过 2 mm 筛用于化学性质测定。

1.3.2 针叶样品的采集 在每木检尺的基础上,每个样地内选择无病虫害、树形和长势基本一致的 5 株平均木作为标准木。用高枝剪从树冠的上、中、下 3 个层次收集东、西、南、北 4 个方向的枝条(每株标准木 12 条),从枝条顶部摘取生长健康、完整的当年生针叶 9 根,将每块标准地收集到的针叶进行混合作为 1 次重复。于实验室内经去离子水清洗、杀青、玛瑙研钵磨碎、混匀、密封储存,用于针叶养分的测定。

1.4 样品的测定

1.4.1 土壤样品的测定 土壤 pH 采用水土比 2.5 : 1 的酸度计法;有机碳(SOC)采用高铬酸钾高温外加热法;全 N(TN)采用凯氏定氮法;全 P(TP)和全 K(TK)采用氢氧化钠熔融法;碱解 N(AN)采用碱解扩散法;有效 P(AP)、速效 K(AK)采用 Mehlich-3 浸提法、交换性 Ca(ACa)、Mg(AMg)、Zn(AZn)采用 Mehlich-3 浸提法;交换性 B(AB)采用甲亚胺比色法测定。

1.4.2 针叶样品的测定 针叶碳(L-C)采用重铬酸钾—浓硫酸高温加热法;氮(L-N)、磷(L-P)、钾(L-K)采用浓硫酸—过氧化氢消煮法;钙(L-Ca)、镁(L-Mg)、锌(L-Zn)采用灰化法;硼(L-B)采用甲亚胺比色法测定。

1.5 数据分析与处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 对数据进行统计分析。首先,对不同林龄土壤和针叶养分含量进行单因素方差分析(One-way ANOVA),LSD 显著性差异

检验,显著性水平( $P<0.05$ )。针叶养分与土壤化学性质指标间的相关性采用 Person 相关分析,2 组变量间的相关性使用 CANOCO 5.0 软件进行冗余分析<sup>[16]</sup>(redundancy analysis, RDA)。同时,使用 SPSS Amos 26.0 软件构建林龄对土壤和叶片养分的影响规律结构方程模型(structural equation model)。

2 结果与分析

2.1 不同林龄马尾松人工林样地土壤化学性质

土壤化学性质指标在不同林龄间均存在显著差异( $P<0.05$ ),且各指标随林龄增加呈现一定的变化(表 2)。随林龄增加,土壤 pH 呈现出先增后减的单峰模式,在 15 a 存在峰值并显著高于其他林龄;有机 C、全 N、全 P 和速效 Ca 含量随林龄的增加呈先减后增的 U 形趋势,在 19 a 中最小且显著低于其他林龄。全 K 含量在 4、15 a 和 56 a 中显著高于其他林龄,且峰值在过熟林中出现。碱解 N、速效 K、速效 Mg 和速效 Zn 含量在 19 a 和 22 a 中显著低于其他林龄,且随着林龄增长呈 U 形趋势。有效 P 含量在 9 a 中显著低于其他林龄,且随着林龄增长呈 W 形趋势。速效 B 含量在 56 a 中显著高于其他林龄,且随着林龄增长呈 U 形趋势。

2.2 不同林龄马尾松人工林叶片养分

针叶养分指标在不同林龄间均存在显著差异( $P<0.05$ ),且各指标随林龄的变化规律并不一致(表 3)。随林龄增加,9、22 a 和 56 a 中针叶碳含量较高(505.85~518.53 g·kg<sup>-1</sup>),而其他林龄碳含量相对较低(491.53~497.84 g·kg<sup>-1</sup>),其中 9 a 中显著高于其他林龄;N 含量在 9、15 a 和 56 a 中相对较高(16.79~18.26 g·kg<sup>-1</sup>),其他林龄相对较低(11.57~15.28 g·kg<sup>-1</sup>),且 15 a 和 56 a 显著高于其他林龄;P 含量在 56 a 中(1.2 g·kg<sup>-1</sup>)显著高于其他林龄,而 15、22 a 和 30 a 中显著低于其他林

表 2 不同林龄马尾松人工林样地土壤化学性质的变化

Table 2 Soil chemical properties of soils sampled under different forest ages in *P. massoniana* plantation

土壤成分	4 a	9 a	15 a	19 a	22 a	30 a	56 a
pH 值	3.98±0.03b	4.01±0.02b	4.10±0.01a	4.02±0.04b	3.99±0.01b	3.88±0.03c	3.82±0.02c
有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	22.87±0.73a	18.56±0.7c	15.67±0.32d	10.90±0.5e	13.27±0.28d	18.91±0.41c	20.72±0.9b
全 N/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.82±0.06a	1.45±0.05bc	1.27±0.02c	0.95±0.07d	1.18±0.02c	1.68±0.09b	1.83±0.04a
全 P/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.05±0.05a	0.67±0.08c	0.53±0.04cd	0.46±0.04d	0.52±0.03d	0.83±0.04b	1.18±0.04a
全 K/(g·kg <sup>-1</sup> )	20.34±0.61a	13.89±0.87c	20.30±0.51a	16.64±0.47b	16.02±0.45b	13.11±0.6c	21.57±0.27a
碱解 N/(g·kg <sup>-1</sup> )	191.45±4.59a	142.27±2.83c	139.2±4.21c	118.51±2.48d	109.2±5.31d	158.81±3.45bc	176.56±4.18b
有效 P/(g·kg <sup>-1</sup> )	2.10±0.21a	1.10±0.07d	1.45±0.04c	2.01±0.05b	1.55±0.11c	1.80±0.09b	2.16±0.04a
速效 K/(g·kg <sup>-1</sup> )	46.54±0.86a	40.57±1.13b	36.80±1.47c	22.10±1.30e	20.30±1.3e	25.50±1.22d	29.29±1.73cd
速效 Ca/(g·kg <sup>-1</sup> )	134.25±6.54a	80.55±4.69cd	67.30±1.85d	50.10±3.83e	69.46±4.15cd	108.35±4.11b	88.42±5.58c
速效 Mg/(mg·kg <sup>-1</sup> )	12.55±0.48a	10.33±0.44b	8.05±0.56b	4.89±0.20d	5.14±0.16d	6.46±0.49c	11.35±0.46b
速效 Zn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	1.70±0.06a	1.61±0.06b	1.29±0.10bc	0.80±0.07c	0.96±0.04c	1.24±0.10bc	1.56±0.07b
速效 B/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.52±0.06ab	0.42±0.06b	0.24±0.04c	0.37±0.05b	0.40±0.05b	0.44±0.05b	0.62±0.06a

注:表中数据为平均值±标准差;不同字母表示同行不同列间差异显著( $P<0.05$ ),相同字母表示同行不同列间无显著差异。下同。

表 3 不同林龄马尾松人工林针叶养分质量分数的变化

Table 3 Leaf nutrient concentrations under different forest ages in *P. massoniana* plantation

养分	4 a	9 a	15 a	19 a	22 a	30 a	56 a
C/(g·kg <sup>-1</sup> )	491.70±6.62b	515.42±3.76a	497.84±5.49ab	491.53±6.85b	505.85±4.68ab	493.69±7.01ab	518.53±2.33ab
N/(g·kg <sup>-1</sup> )	15.28±0.95bc	16.79±0.45ab	17.72±0.40a	11.57±0.44d	14.76±0.49c	14.69±0.44c	18.26±0.47a
P/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.78±0.01bc	0.89±0.04b	0.69±0.03c	0.88±0.05b	0.75±0.05c	0.74±0.05c	1.20±0.05a
K/(g·kg <sup>-1</sup> )	6.02±0.11c	6.08±0.13c	3.54±0.42e	5.07±0.1d	3.57±0.43e	8.09±0.49b	9.26±0.29a
Ca/(g·kg <sup>-1</sup> )	9.28±0.30ab	5.86±0.56c	10.40±0.49a	8.24±0.27b	8.73±0.46b	8.19±0.36b	5.29±0.35c
Mg/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.98±0.07a	0.60±0.02c	0.70±0.08bc	0.93±0.05a	0.73±0.05bc	0.85±0.05ab	0.68±0.06c
Zn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	50.45±2.12b	35.51±1.81cd	42.54±2.06c	37.3±2.26cd	42.48±2.41c	76.52±3.20a	31.7±3.43d
B/(mg·kg <sup>-1</sup> )	19.47±0.64a	18.24±0.47a	18.41±0.59a	16.59±0.39b	19.39±0.81a	18.72±0.56a	18.56±0.40a

龄(0.69~0.75 g·kg<sup>-1</sup>);K 含量在 30 a 和 56 a 中相对较高(8.09~9.26 g·kg<sup>-1</sup>);Ca 含量在 15 a 中显著高于其他林龄,而在 9 a 和 56 a 中含量相对较低(5.29~5.86 g·kg<sup>-1</sup>);Mg 含量在 4、19 a 和 30 a 中(0.85~0.98 g·kg<sup>-1</sup>)显著高于其他林龄;Zn 含量在 4 a 和 30 a 中(50.45~76.52 g·kg<sup>-1</sup>)显著高于其他林龄(31.7~42.54 g·kg<sup>-1</sup>);B 含量在 19 a 中(16.59 g·kg<sup>-1</sup>)显著低于其他林龄。

### 2.3 马尾松针叶养分含量与土壤化学性质相关性分析

马尾松针叶养分含量与土壤化学性质之间呈现较好的相关性水平,且土壤有机质与速效养分各养分指标间均呈现显著相关性( $P<0.05$ ,图 1)。针叶 K 与土壤速效 K 含量呈显著正相关,针叶 Ca、Mg、Zn、B 分别与土壤有效 Ca、Mg、Zn、B 含量呈极显著正相关。土壤 pH 与针叶 Ca 含量呈极显著正相关,而与针叶 P、K 含量呈极显著负相关;土壤有机碳与针叶 K 和 B 含量呈极显著正相关,而与土壤全 N、碱解 N 含量呈极显著正相关。此外,土壤全 N 与碱解 N 含量、全 P 与有效 P 含量、全 K 与速效 K 含量均存在极显著正相关。

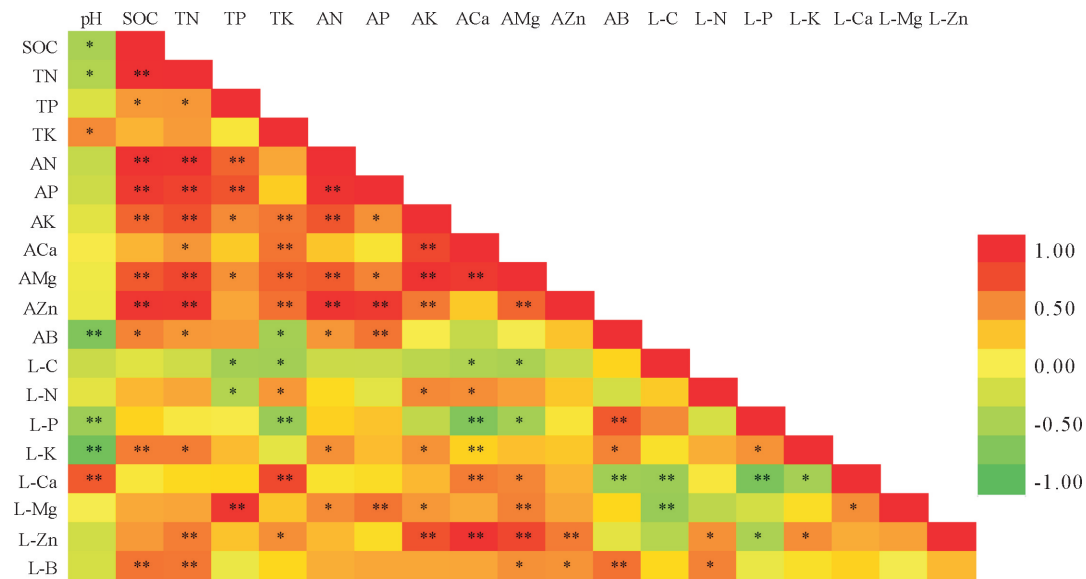
RDA 分析结果表明,土壤有机碳、全 N、有效 P 和速效 K 是马尾松叶片养分含量变化的敏感因素

(图 2)。第 1 个排序 RDA 轴(RDA1)解释了总变异性的 57.37% 的方差变化,第 2 个排序 RDA 轴(RDA2)解释了 22.63% 的方差变化,共解释了总变异的 80% 的方差变化。RDA1 主要与有机碳、全 N、有效 P 和速效 K 的含量呈显著正相关,与 pH 呈显著负相关。RDA2 主要与速效 Ca 呈显著负相关。

### 2.4 林龄对土壤和叶片养分含量的影响

马尾松人工林的长期种植(林龄)对土壤有机碳、速效养分和针叶叶片养分的含量均产生了正向影响(系数分别为 0.33、0.15 和 0.09),而对土壤 pH 和全量养分产生了负向影响(系数分别为 -0.60 和 -0.25),表明马尾松人工林的长期种植(林龄)对土壤化学性质和针叶养分能产生影响但影响过程并不一致。马尾松人工林的长期种植(林龄)对针叶养分的影响主要通过影响土壤化学性质进而影响针叶养分的间接效应更加显著( $P<0.05$ ),而直接影响并不显著(图 3)。土壤化学性质与针叶养分的相互作用过程中,土壤速效养分对针叶养分含量产生了正向影响(系数为 0.68),土壤全量养分和有机碳对针叶养分含量产生了负向影响(系数分别为 -0.76 和 -0.41),且均具有显著性影响( $P<0.05$ ),而土壤 pH 对针叶养分的影响并不显著。





注: SOC, 有机碳; TN, 全氮; TP, 全磷; TK, 全钾; AN, 碱解氮; AP, 有效磷; AK, 速效钾; ACa, 速效钙; AMg, 速效镁; AZn, 速效锌; AB, 速效硼; L-C, 叶片碳; L-N, 叶片氮; L-P, 叶片磷; L-K, 叶片钾; L-Ca, 叶片钙; L-Mg, 叶片镁; L-Zn, 叶片锌; L-B, 叶片硼; \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

图 1 叶片养分含量与土壤化学性质相关性系数的热图

Fig. 1 Heat map of correlation coefficients between leaf nutrient concentrations and soil chemical properties

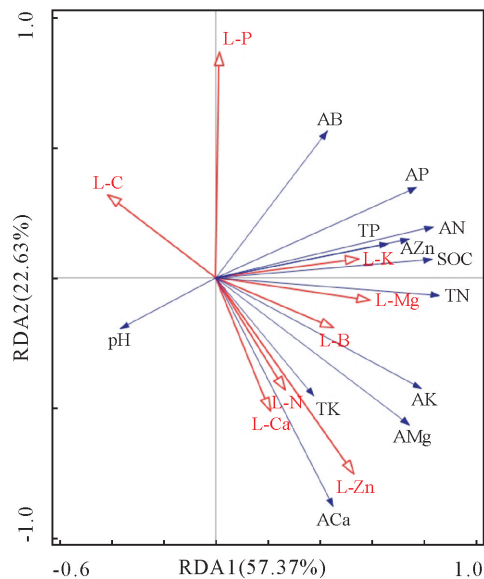


图 2 马尾松针叶养分含量与土壤化学性质的冗余分析

Fig. 2 Redundant analysis between leaf nutrients and soil chemical properties in *P. massoniana* plantation

3 结论与讨论

3.1 结论

不同林龄马尾松林土壤化学性质均具有显著差异( $P<0.05$ ),土壤 pH 随林龄增加呈先增后减趋势,中龄林达到最大为 4.1( $<4.5$  呈酸性),不同养分元素含量所出现的最大值有所不同,但均呈现为马尾松进入中龄林后土壤整体肥力质量有所下降,为维持土壤肥力、提高林分生产力,应注重中龄林后土壤地力的维持。

马尾松针叶养分含量随林龄增加呈波动性变化趋势,整体上在中龄—近熟林阶段针叶养分含量普遍偏小,说明马尾松进入中林龄后对养分的吸收和利用效率有所减小。

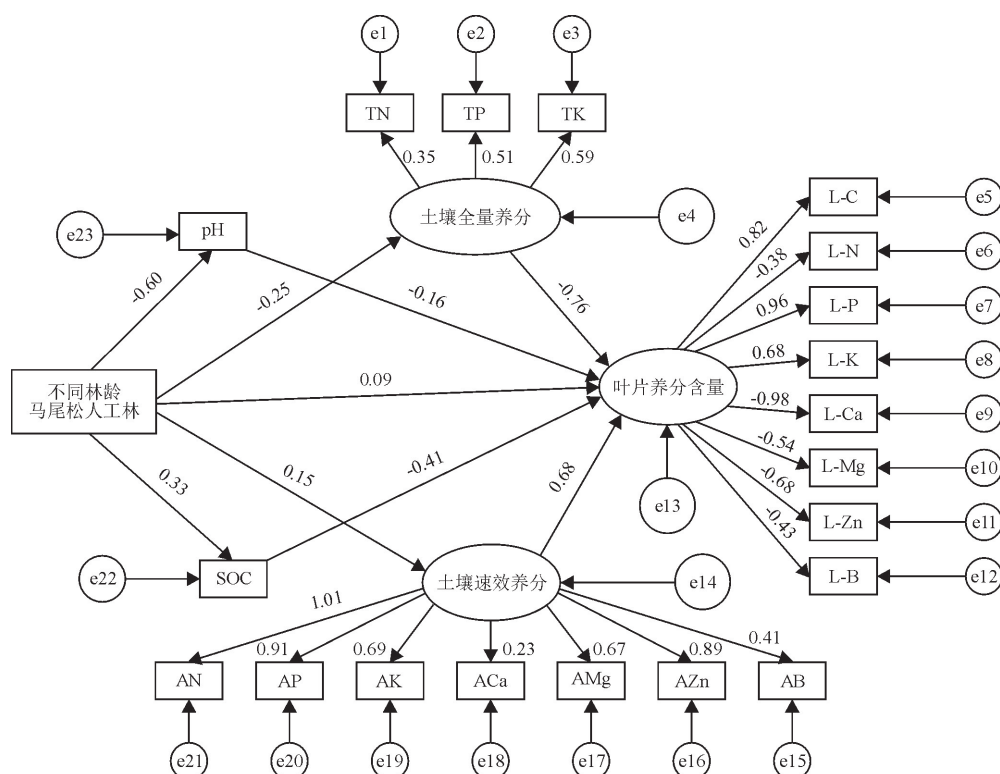
林龄对马尾松针叶养分含量的影响,是通过直接影响土壤化学性质的方式间接影响叶片养分含量。土壤速效养分与针叶养分含量呈显著正相关,其随林龄变化具有很好的协同效应,而土壤全量养分和有机碳呈显著负相关。土壤有机碳、全 N、有效 P 和速效 K 是影响马尾松针叶养分含量变化的重要因素。

林龄对土壤和叶片养分均具有显著影响,尤其是进入中林龄后,土壤和叶片养分均有所下降,尤其是受 N 素和微量元素限制,为此在马尾松中龄林后,建议施用 N 肥满足其健康生长,并辅以适量微量元素以增强植物光合作用和蛋白质的合成及抗逆性。

3.2 讨论

3.2.1 林龄对马尾松人工林土壤化学性质的影响

土壤化学性质作为土壤养分的直接反馈者代表了土壤养分的可利用性<sup>[17-18]</sup>。大量研究表明,林龄会对马尾松林土壤理化性质产生显著影响<sup>[19-20]</sup>,但不同林龄土壤养分元素的增加和减小的趋势并不一致,植物对土壤养分各指标的吸收、利用效率在不同生理阶段呈现不同规律<sup>[8]</sup>。这与本研究中不同林龄马尾松林土壤化学性质间均存在显著差异这一结果相似,表明马尾松林在不同生长周期,其土壤理化性质丰缺指标并不一致,土壤肥力质量在不同林龄中



注:卡方检验值(chi-squared test),  $CMIN/DF=3.258<5$ , 标准化通径系数(standardized path coefficients),  $P<0.05$ 。

图3 不同林龄马尾松人工林叶片养分含量和土壤化学性质的标准化结构方程模型

Fig. 3 Standardized structural equation model of leaf nutrients and soil chemical properties under different forest ages in *P. massoniana* plantation

的波动变化,在经营的过程中更应该注重不同林龄的管理措施,如施肥等。在马尾松长期生长过程中,有机碳、碱解 N 和速效态 K、Ca、Mg、Zn 均在 4 a 中最大,尤其是中龄林(15 a)后土壤化学性质指标除 pH 和速效 B 外均显著小于 4 a,其原因可能是由于马尾松在成熟过程中不断消耗土壤肥力,而中龄林后均采用近自然经营方式,土壤养分未及时补充,仅依靠凋落物分解难以维持林地土壤肥力的长期性<sup>[21-22]</sup>,而在 56 a 时土壤全量养分又有所恢复。此外,土壤化学性质指标随林龄变化呈现一定的变化规律,但各元素的变化规律并不一致,有机碳、全 N、全 P、碱解 N 和速效态 K、Ca、Mg、Zn 和 B 含量呈先减后增的 U 形变化,全 K 和有效 P 含量呈 W 形变化,这种不均衡性变化规律可能是由于马尾松不同生长阶段对土壤元素的吸收利用效率不同所导致,这与植物养分利用机制的不同导致土壤养分的不均匀效应的规律相一致。

### 3.2.2 林龄对马尾松人工林叶片养分含量的影响

叶片养分表明植物体在生长过程中营养状态,叶片营养诊断也被作为土壤丰缺情况分析的重要课题<sup>[23]</sup>。本研究中,不同林龄对针叶养分指标均存在显著差异,且各指标养分含量随林龄呈波动性变化。这可能是由于随林龄增加林木—土壤之间的交互作

用发生改变,导致林木生理生化机制进行不同类型的分化,以及与土壤的适应和相互协调能力改变,导致林木吸收、利用和储存养分元素能力差异较大<sup>[24]</sup>。同时,这些波动性变化表明林龄对马尾松针叶养分具有显著性影响,而随林龄的变化规律并不明显,叶片养分显示植物的吸收利用特性在不同林龄存在显著差异,在吸收利用过程中,叶片在凋落前,养分含量对于植物养分的再吸收效率具有显著影响<sup>[8]</sup>。曾德慧等<sup>[25]</sup>通过不同林龄樟子松叶片养分含量及其再吸收效率的研究表明,樟子松叶片养分含量在不同林龄间均具有显著性差异,而随樟子松年龄增加并没有表现出有规律的变化,这与本研究结果相似。

### 3.2.3 马尾松土壤化学性质与叶片养分含量的关系分析

土壤化学性质与叶片养分间的相互关系较为复杂,土壤中某种元素的含量不仅对叶片中该种养分元素产生直接影响,同时还影响其他养分元素的吸收利用状况<sup>[26-27]</sup>。马尾松针叶 K、Ca、Mg、Zn、B 与土壤对应元素呈显著正相关,同时还与其他土壤元素相关性显著,如针叶锌与土壤全 N、全 K、速效 K、速效 Ca、速效 Mg 和速效 Zn 呈显著正相关,这表明土壤与叶片养分间对应元素存在明显相互作用过程,土壤养分除能够影响所对应元素外,还能影

响其他养分的吸收利用,A. Saarsalmi *et al.*<sup>[28]</sup>也有相似的研究结果。何斌等<sup>[29]</sup>研究表明,马尾松叶片C、N和P含量与其对应土壤C、N、P之间的相关性并不显著,这与本研究中针叶与土壤C、N、P的相关性并不显著的结果相一致。冗余分析表明,土壤有机C、全N、有效P和速效K是影响马尾松叶片养分含量变化的重要因素,其测量的环境变量解释了马尾松叶片养分含量总变异系数的80%,表明植物叶片养分含量在一定程度上受环境变量影响较大,土壤养分作为林木生长的物质来源,通过呼吸、矿化和生物代谢活动来进行养分存储<sup>[29]</sup>。此外,叶片养分含量倾向于与所有环境变量呈正相关,表明马尾松人工林中的养分蓄积和土壤养分高度依赖彼此。这种土壤与叶片的密切关系,为马尾松人工林土壤改良过程提供了重要的指导作用,在植物养分的诊断过程中,应该充分考虑各种养分元素之间的相互配合因素,充分发挥元素间的耦合效应。

3.2.4 马尾松土壤化学性质与叶片养分含量随林龄的变化规律 通过构建结构方程对马尾松长期发育过程中土壤和针叶养分之间进行直接或间接影响分析,从总体调控角度揭示马尾松长期种植过程中土壤—植物的养分传输机制,为进一步进行马尾松人工林土壤环境和肥力的提升提供理论依据<sup>[30]</sup>。本研究中,林龄对马尾松针叶养分含量的影响主要通过间接影响产生,即通过直接影响土壤化学性质的方式间接影响叶片养分含量。土壤速效养分对针叶养分含量产生了正向影响,土壤全量养分和有机碳对针叶养分含量产生了负向影响,且均具有显著性影响( $P < 0.05$ ),表明土壤化学元素对叶片养分吸收的影响并非都是促进作用,其通过土壤内部各种化学元素的相互抑制或促进过程,进而影响针叶养分的吸收作用。如土壤中氮元素的增加,影响植物对 $\text{Ca}^{2+}$ 的吸收,而土壤中 $\text{Ca}^{2+}$ 对 $\text{Mg}^{2+}$ 的吸收具有拮抗作用,土壤K元素含量高,则对 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和N元素的吸收均产生拮抗作用<sup>[31-32]</sup>。此外,土壤pH值对针叶养分的影响并不显著,这可能是由于南方土壤普遍偏酸性,马尾松在长期生长过程中,适应了酸性环境影响,然而土壤—植物之间的适应性机制及其信号传输机制仍未可知。因此,马尾松林土壤和植物养分之间的适应性及其信号传输机制值得进一步研究,以了解马尾松如何利用土壤元素,从而针对性地对土壤环境进行改善,提高森林土壤养分利用效率。

## 参考文献:

[1] 丁贵杰,吴协保,齐新民,等.马尾松纸浆材林经营模型系统及

优化栽培模式研究[J].林业科学,2002,38(5):7-13.

DING G J, WU X B, QI X M, *et al.* Research on masson pine pulp-wood forest management model system and optimal cultivation model[J]. Forestry Science, 2002, 38(5): 7-13. (in Chinese)

[2] WANDER M M, WALTER G L, NISSEN T M, *et al.* Soil quality[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(1): 23-33.

[3] BÜNEMANN E K, BONGIORNO G, BAI Z, *et al.* Soil quality-A critical review[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2018, 120: 105-125.

[4] MANIVANNAN S, CHADHA K L. Standardization of time of sampling for leaf nutrient diagnosis on kinnow mandarin in north-west india[J]. Journal of Plant Nutrition, 2011, 34(12): 1820-1827.

[5] 范家慧,张鹏,程宁宁,等.海南‘红金龙’芒果叶片矿质养分特征与诊断指标[J].热带作物学报,2019,40(3):438-444.

FAN J H, ZHANG P, CHENG N N, *et al.* Mineral nutrient characteristics and diagnostic indexes of mango leaves in Hainan ‘Red Golden Dragon’[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(3): 438-444. (in Chinese)

[6] 王飞,马剑平,马俊梅,等.民勤不同林龄胡杨根区土壤理化性质及相关性分析[J].西北林学院学报,2020,35(3):23-28,54.

WANG F, MA J P, MA J M, *et al.* Analysis of soil physical and chemical properties and their correlation in the root zone of Populus euphratica at different forest ages in Minqin[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(3): 23-28, 54. (in Chinese)

[7] 贾丹,王琪瑶,肖宇飞,等.天然东北红豆杉林土壤细菌多样性研究[J].森林工程,2022,38(3):26-31,39.

[8] 庄亚珍.不同林龄马尾松针叶养分含量及其再吸收效率[J].安徽农学通报,2010,16(18):27-28,52.

[9] 许森平,张欣怡,李文杰,等.不同林龄刺槐叶片养分重吸收特征及其对土壤养分有效性的响应[J].应用生态学报,2020,31(10):3357-3364.

XU M P, ZHANG X Y, LI W J, *et al.* Leaf nutrient reabsorption characteristics of robinia pseudoacacia at different forest ages and its response to soil nutrient availability[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(10): 3357-3364. (in Chinese)

[10] 王海伦.湖南会同杉木人工林不同林龄养分含量动态研究[D].长沙,中南林业科技大学,2019.

[11] BURKE D J, WEINTRAUB M N, HEWINS C R, *et al.* Relationship between soil enzyme activities, nutrient cycling and soil fungal communities in a northern hardwood forest[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43(4): 795-803.

[12] 曹胜,欧阳梦云,周卫军,等.湖南省柑橘园土壤营养状况及其对叶片养分的影响[J].土壤,2019,51(4):665-671.

CAO S, OUYANG M Y, ZHOU W J, *et al.* Soil nutrient status of citrus orchards in Hunan Province and its effect on leaf nutrients[J]. Soil, 2019, 51(4): 665-671. (in Chinese)

[13] CHOI H S, ROM C R, GU M. Effects of different organic apple production systems on seasonal nutrient variations of soil and leaf[J]. Entia Horticulturae, 2011, 129(1): 9-17.

[14] 盘金文,郭其强,孙学广,等.不同林龄马尾松人工林碳、氮、磷、钾养分含量及其生态化学计量特征[J].植物营养与肥料学报,2020,26(4):746-756. (in Chinese)

PAN J W, GUO Q Q, SUN X G, *et al.* Carbon, nitrogen,

- phosphorus and potassium nutrient contents and ecological stoichiometry characteristics of masson pine plantations of different ages[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2020, 26(4): 746-756. (in Chinese)
- [15] 何斌, 李青, 冯图, 等. 不同林龄马尾松人工林针叶功能性状及其与土壤养分的关系[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2020, 44(2): 181-190.  
HE B, LI Q, FENG T, *et al.* The needle leaf functional characteristics of masson pine plantations of different ages and their relationships with soil nutrients[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2020, 44(2): 181-190. (in Chinese)
- [16] DELSOLE T, CHANG P. Predictable component analysis, canonical correlation analysis, and autoregressive models[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2010, 60(2): 409-416.
- [17] 刘洁, 李茗, 吴立潮. 南方红壤区油茶林土壤肥力质量指标及评价[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(4): 73-80.  
LIU J, LI M, WU L C. Soil fertility quality index and evaluation of *Camellia oleifera* forest in southern red soil area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(4): 73-80. (in Chinese)
- [18] LIU Z J, ZHOU W. Soil quality assessment of albic soils with different productivities for eastern China[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 140(14): 74-81.
- [19] 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 等. 不同林龄马尾松人工林下植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2610-2617.  
CUI N J, ZHANG D J, LIU Y, *et al.* Understory plant diversity and soil physical and chemical properties of masson pine plantations of different ages[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(10): 2610-2617. (in Chinese)
- [20] 郝中明, 曾青, 明乐, 等. 广西南部地区不同林龄马尾松及其混交林理化性质研究[J]. 广东农业科学, 2018, 45(1): 39-43.  
HAO Z M, ZENG Q, MING L, *et al.* Study on the physical and chemical properties of different ages of masson pine and its mixed forest in southern Guangxi[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2018, 45(1): 39-43. (in Chinese)
- [21] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 193-203.  
GE X G, XIAO W F, ZENG L X, *et al.* The relationship between masson pine litter substrate quality and soil nutrients in different forest ages[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(3): 193-203. (in Chinese)
- [22] 潘复静, 梁月明, 马姜明, 等. 不同林龄和密度对马尾松人工林凋落叶养分变化的影响[J]. 广西植物, 2020, 40(2): 237-246.  
PAN F J, LIANG Y M, MA J M, *et al.* Effects of different forest ages and densities on the nutrient changes of masson pine plantations[J]. Guihaia, 2020, 40(2): 237-246. (in Chinese)
- [23] 田赞, 王海燕, 孙向阳, 等. 三倍体毛白杨人工林施肥与营养诊断研究进展[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(6): 83-87.  
TIAN Y, WANG H Y, SUN X Y, *et al.* Research progress on fertilization and nutritional diagnosis of triploid *Populus tomentosa* plantation[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(6): 83-87. (in Chinese)
- [24] 吕中诚, 康文星, 黄志宏, 等. 不同林龄杉木组织迁移养分的再利用[J]. 植物生态学报, 2019, 43(5): 458-470.  
LÜ Z C, KANG W X, HUANG Z H, *et al.* Reuse of nutrients transferred from Chinese fir tissues of different forest ages[J]. Acta Plant Ecology, 2019, 43(5): 458-470. (in Chinese)
- [25] 曾德慧, 陈广生, 陈伏生, 等. 不同林龄樟子松叶片养分含量及其再吸收效率[J]. 林业科学, 2005, 41(5): 21-27.  
ZENG D H, CHEN G S, CHEN F S, *et al.* Leaf nutrient content and reabsorption efficiency of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in different forest ages[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(5): 21-27. (in Chinese)
- [26] 邱权, 李吉跃, 王军辉, 等. 柴达木盆地不同居群白刺叶片营养与土壤养分的回归分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(11): 121-128.  
QIU Q, LI J Y, WANG J H, *et al.* Regression analysis of leaf nutrition and soil nutrients of *Nitraria tangutorum* from different populations in Qaidam Basin[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition, 2014, 42(11): 121-128. (in Chinese)
- [27] 黄登婧, 张静, 霍建强, 等. 兰州市行道树法桐叶片营养和土壤养分相关性分析[J]. 草原与草坪, 2018, 38(5): 43-48, 53.  
HUANG D J, ZHANG J, HUO J Q, *et al.* Correlation analysis of leaf nutrition and soil nutrient of the street tree *Phylanthus vulgaris* in Lanzhou[J]. Grassland and Turf, 2018, 38(5): 43-48, 53. (in Chinese)
- [28] SAARSALMI A, MLKNEN E, KUKKOLA M. Effect of wood ash fertilization on soil chemical properties and stand nutrient status and growth of some coniferous stands in Finland[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2004, 19(3): 217-233.
- [29] 何斌, 李青, 冯图, 等. 黔西北不同林龄马尾松人工林针叶-凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2019, 28(11): 2149-2157.  
HE B, LI Q, FENG T, *et al.* Conifer-Litter-soil C, N, P stoichiometric characteristics of different ages of *Pinus massoniana* plantations in northwestern Guizhou[J]. Acta Eco-Environmental Science, 2019, 28(11): 2149-2157. (in Chinese)
- [30] ZHU L, WANG X, CHEN F, *et al.* Effects of the successive planting of *Eucalyptus urophylla* on the soil bacterial and fungal community structure, diversity, microbial biomass, and enzyme activity[J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(6): 636-646.
- [31] 陈小红, 李贤伟, 赵安玖. 林木营养元素交互作用研究综述[J]. 四川林勘设计, 2001(1): 21-24.  
CHEN X H, LI X W, ZHAO A J. Summary of the research on the interaction of forest nutrient elements[J]. Sichuan Forestry Research and Design, 2001(1): 21-24. (in Chinese)
- [32] 张德山, 何文寿. 植物营养元素之间的相互关系及其机理[J]. 农业科学研究, 1993(2): 75-81.  
ZHANG D S, HE W S. The relationship and mechanism of plant nutrient elements[J]. Journal of Agricultural Sciences, 1993(2): 75-81. (in Chinese)