

氮磷喷施对刨花楠叶片养分再吸收效率的影响*

费玲^{1,3} 钟全林^{1,2,3**} 程栋梁^{1,2,3} 徐朝斌^{1,3} 张中瑞^{1,3} 张蕾蕾^{1,3}

¹福建师范大学地理科学学院 福州 350007

²福建师范大学地理研究所 福州 350007

³湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地 福州 350007

摘要 为了解根外追肥对常绿阔叶树种养分再吸收的影响,以7.5年生刨花楠 (*Machilus pauhoi*, MP) 人工林为研究对象,设置不同的氮(N)、磷(P)梯度对叶片进行根外追肥,并分别于6月、9月、12月对成熟新叶与衰老叶进行采样,测定其N、P含量,计算其N、P再吸收效率;采用双因素方差分析法分析不同喷施处理与不同季节对刨花楠叶片N、P再吸收效率的影响。结果表明:(1)除低N且N、P配施与中N且N、P配施处理外,其余N、P喷施处理对刨花楠叶片N、P再吸收效率有显著影响($P < 0.05$);同一处理组内刨花楠在不同季节,其叶片N、P再吸收效率也存在显著差异($P < 0.05$) (单施P除外);(2)生长旺季时叶面喷施N肥能够促进叶片对P元素的吸收,叶面喷施P肥能够促进叶片对N元素的吸收;N、P再吸收效率之间呈显著正相关($P < 0.05$);(3)叶片在衰老过程中存在明显的N再吸收现象。可见不同喷施处理对于不同季节的叶片N、P再吸收效率的影响机制不同。本研究结果可为探讨亚热带珍稀常绿阔叶树种养分循环利用以及贫瘠立地环境植物养分保存机制等提供理论依据。表3 参40

关键词 氮磷配施;叶面喷施;不同季节;养分再吸收效率;刨花楠

CLC Q945.79

Effect of nitrogen and phosphorus spraying on leaf nutrient resorption efficiency of *Machilus pauhoi**

FEI Ling^{1,3}, ZHONG Quanlin^{1,2,3**}, CHENG Dongliang^{1,2,3}, XU Chaobin^{1,3}, ZHANG Zhongrui^{1,3} & ZHANG Leilei^{1,3}

¹College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

²Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

³State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

Abstract For a comprehensive understanding of the nutrient conservation mechanism of *Machilus pauhoi* in subtropical zone, we need to know the response of leaf nutrient resorption efficiency to the environment and fertilizer. This research aimed to study the variation of leaf nutrient resorption efficiency with nitrogen and phosphorus spraying in different seasons. A 7.5-year-old *M. pauhoi* plantation in Fujian Province was taken as research object. Different levels of N and P were set by foliage top-dressing to the plantation. Samples were taken to determine their nutrient contents in June, September and December. Two-factor Variance Analysis was used to analyze the effect of the seasons and N, P spraying on the leaf nutrient resorption efficiency. The results showed that 1) different levels of N, P spraying had significant effects on leaf N, P resorption efficiency except for the low level N with N/P combined addition, and the medium level N with N/P combined addition; there were significant differences in N and P resorption efficiency of different seasons under different levels of fertilization (except for P addition. 2) N spraying could help vegetation to absorb P efficiently, and vice versa, in growing season; there was a positive relation between the resorption efficiency of N and P. 3) In mature leaves N resorption efficiency was positively related to N content, but in senesced leaves N resorption efficiency was negatively related to N content. An obvious N, P resorption phenomenon existed in *M. pauhoi* leaves in the process of senescing. The N and P resorption efficiency showed significant differences responding to fertilization and seasons. This research added our knowledge about the nutrient conservation mechanism of evergreen broad-leaved forest in subtropical zone.

Keywords nitrogen and phosphorus combined addition; foliage top-dressing; different season; nutrient resorption efficiency; *Machilus pauhoi*

收稿日期 Received: 2014-07-29 接受日期 Accepted: 2014-10-28

*国家自然科学基金项目(31170596, 31170374, 31370589)、福建省种业创新项目(2014S1477-4)、福建省重大科技项目(2014N5008)和国家农业科技成果转化资金项目(2011GB2C400005)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31170596, 31170374, 31370589), the Seed Industry Innovation Project of Fujian Province (2014S1477-4), the Major S & T Project of Fujian Province (2014N5008), and the National Agricultural Science and Technology Achievements Transformation Projects (2011GB2C400005)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: qlzhong@126.com)

氮(N)、磷(P)是植物生长必需的两种重要养分元素,影响植物生理生态特性,并对植物生长发育、群落组成以及生态系统维持等有着重要影响^[1-3]。叶片N、P养分的有效性,与植物生长密切相关。养分从衰老叶片向其它组织运输供其循环利用的过程叫做养分再吸收(Nutrient resorption),可用再吸收效率(Resorption efficiency, RE)或再吸收程度(Resorption proficiency, RP)表示^[4-5]。养分再吸收不仅是植物对贫瘠的立地环境适应进化机制,也是植物保存养分、增强竞争力、提高养分利用效率的重要策略^[6-8]。近年来,国内已有杨树^[9-12]、沙地柏^[13]、樟子松^[14]等一些生长在北方自然环境中的林木养分再吸收效率的相关报道,但关于施肥处理对林木叶片养分再吸收效率的影响研究则相对不足。施肥会使植物叶绿素含量、酶活性、糖类代谢等相应发生变化,进而影响其光合特性^[15-17],它不仅影响林木自身生长,而且影响森林养分循环过程,进而影响森林生产力^[18-19]。不同的施肥处理和施肥方式对植物的养分吸收影响不同。前人研究了一般施肥方式(即对土壤添加N、P肥)对叶片养分再吸收效率的影响^[18, 20],但此施肥方式养分转化慢、用量大,有些元素如P、钾(K)会被土壤固定、淋溶,而采用根外施肥方式(即叶面喷施)可使植物养分吸收运转快,利用率高,容易满足植物需求且用量少,是一种促进植物养分有效利用的施肥方式。相关研究发现,根外追施N、P不仅能够提高文心兰(*Oncidium Hybrid*)^[21]、枣树(*Ziziphus jujuba*)^[22]、油桃(*Amygdalus persica* var. *nectarina*)^[23]等植物生长量(如干物质含量、干重等),还能影响其生理特性(如可溶性固形物、可溶性糖、花青苷和类胡萝卜素含量)。从已有成果看,有关根外追肥对养分吸收的影响研究主要集中于草本植物及落叶阔叶树木^[21-23],而其如何影响我国亚热带区域典型地带性植被常绿阔叶树种的养分再吸收效率的相关研究成果目前还未见报道。

刨花楠(*Machilus pauhoi*)属樟科润楠属,又名刨花树、刨花润楠等,是我国亚热带地区优良速生的珍稀常绿阔叶树种,生长快,外形美观,既可作为用材树种,又可用于庭院、城市绿化。目前国内对刨花楠的研究主要集中在生长特性^[24-27]、生理特性^[28]、人工栽培繁殖与培育技术^[29-30]等方面,缺乏对其养分再吸收效率方面的研究,因此,我们以福建省永安市7.5年生刨花楠人工林为对象,通过不同梯度N、P根外追肥实验,研究施肥对刨花楠养分再吸收效率的季节动态影响机制,以期高效培育刨花楠人工林,进一步探讨亚热带珍稀常绿阔叶树种养分循环利用和贫瘠立地环境植物养分保存机制等提供理论依据,并为开展亚热带地区其它珍稀阔叶商品林高效经营与肥力管理技术,探讨全球环境变化(如N沉降等)对亚热带常绿阔叶树种生理生态的影响机制等提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验地位于福建省三明市永安低山地形中下坡位,地理坐标约为25°57'30"N, 117°26'15"E,海拔约为490-560 m,平均坡度约25°。属于亚热带季风气候,气候温暖,雨量充沛,阳光

充足,四季分明。年均气温19.4℃,最冷月1月份平均气温9.7℃,最热月7月份平均气温28.2℃。年均降水量1 762 mm,多集中在2-9月。年均无霜期302 d,年均日照时数约1 629.3 h。实验于2012年展开,属正常年份,无逆境天气。试验区土壤为红壤,pH值为4.27,全N含量为1.485 mg/g,全P含量为0.214 mg/g。

1.2 试验设计方法

在永安7.5年生(含苗龄,2006年造林)的刨花楠人工林内开展试验,试验林株行距为1.5 m × 1.5 m,初始平均胸径为5.44 cm,初始平均树高为4.31 m。试验共设置了单施N,单施P,低N且N、P配施,中N且N、P配施,高N且N、P配施5个处理组共16个处理,即1个对照(CK)与15个处理。15个处理分别为:3个N供给等级[低N(T1)、中N(T2)、高N(T3)],其纯N量分别为50 kg hm⁻²、100 kg hm⁻²、150 kg hm⁻²;3个P供给等级[低P(T4)、中P(T5)、高P(T6)],其纯P量分别为5 kg hm⁻²、10 kg hm⁻²、20 kg hm⁻²;3个N供给等级(低N、中N、高N)条件下的3个N:P比水平(5:1、10:1、20:1,P含量按照实际纯N供给量及N:P计算,代号分别为T7-T15)(表1)。每个处理有3个重复样地,面积为10 m × 10 m。N用固态NH₄NO₃,P用固态P₂O₅,按实验设计确定的不同等级所需的纯N、纯P施用量,通过当量换算,确定各处理所需的NH₄NO₃和P₂O₅量。施肥时期为2012年3-9月(共7次),每次称取计算所需的NH₄NO₃和P₂O₅总量的1/7,将其溶于20 L水中,于每月月底晴朗无风的上午9:00-11:00,使用双喷头喷雾器将其水溶液按样方面积在树冠上方向下均匀喷施。为了避开施肥时间,并考虑到生长季与非生长季差别,取样日期确定为2012年6月、9月与12月的15-16日。刨花楠叶片叶龄一般为2年,取样时摘取树冠中上部外圈喷施肥料后长势正常、无病虫害的完整的成熟新叶与衰老叶,带回实验室烘干、粉碎、过筛。

1.3 测定指标与方法

叶片碳(C)、N含量采用CHNOS元素分析仪(Elemental Analyzer Vario EL III,德国)进行测定,P含量测定采用(H₂SO₄-H₂O₂消煮)钼锑抗比色法^[31]。

1.4 数据分析方法

N、P再吸收效率(RE)用从衰老叶中吸收的N、P元素含量占成熟新叶元素含量的百分率^[5, 18, 32]来计算,其计算公式为: $r_{RE} = (A1 - A2) / A1 \times 100\%$ 。其中,A1为成熟新叶的N或P含量,A2为衰老叶片的N或P含量。

利用SPSS 17.0统计分析软件,分别按单施N,单施P,低N且N、P配施,中N且N、P配施与高N且N、P配施5个处理组,采用双因素方差分析法分析同一处理组内不同喷施处理与不同季节对刨花楠叶片N、P再吸收效率的影响,并利用回归分析法分析喷施后刨花楠叶片N、P养分再吸收效率,叶片N、P含量及N:P比各变量之间的相关关系。

2 结果与分析

对5个处理组内不同喷施处理与不同季节对刨花楠叶片N、P再吸收效率影响的双因素方差分析结果显示,除低N且N、P配施与中N且N、P配施外,其余N、P喷施处理对刨花楠叶片N、P再吸收效率均有显著影响($P < 0.05$);同一处理组

表1 不同施肥处理的刨花楠叶片N、P再吸收效率的差异比较

Table 1 Leaf N and P resorption efficiency in different treatments

处理组 Treatment group	处理 Treatment	代号 Code	N再吸收效率 (r/%) N resorption efficiency	P再吸收效率 (r/%) P resorption efficiency
单施N N addition	对照 Control	CK	19.25 ± 5.23a	22.20 ± 5.54b
	低N Low level N	T1	15.03 ± 8.83b	23.22 ± 3.82b
	中N Medium level N	T2	17.26 ± 4.32ab	27.08 ± 8.20a
	高N High level N	T3	18.60 ± 6.56a	22.19 ± 3.63b
单施P P addition	对照 Control	CK	19.25 ± 5.23a	22.20 ± 5.54a
	低P Low level P	T4	12.36 ± 6.52b	16.34 ± 5.38b
	中P Medium level P	T5	21.40 ± 12.00a	23.82 ± 1.67a
	高P High level P	T6	19.53 ± 5.79a	22.38 ± 13.18a
低N且N、P配施 Low level N with N/P combined addition	对照 Control	CK	19.25 ± 5.23a	22.20 ± 5.54a
	低N且N:P = 5:1 Low level N and N:P = 5:1	T7	18.63 ± 7.88a	24.45 ± 9.09a
	低N且N:P = 10:1 Low level N and N:P = 10:1	T8	16.18 ± 2.18b	21.86 ± 7.97a
	低N且N:P = 20:1 Low level N and N:P = 20:1	T9	15.52 ± 11.2b	24.28 ± 5.92a
中N且N、P配施 Medium level N and N/P combined addition	对照 Control	CK	19.25 ± 5.23bc	22.20 ± 5.54a
	中N且N:P = 5:1 Medium level N and N:P = 5:1	T10	18.44 ± 8.95c	23.40 ± 7.66a
	中N且N:P = 10:1 Medium level N and N:P = 10:1	T11	23.09 ± 6.61a	26.25 ± 7.52a
	中N且N:P = 20:1 Medium level N and N:P = 20:1	T12	21.03 ± 8.24b	25.34 ± 7.82a
高N且N、P配施 High level N and N/P combined addition	对照 Control	CK	19.25 ± 5.23b	22.20 ± 5.54 b
	高N且N:P = 5:1 High level N and N:P = 5:1	T13	24.69 ± 1.33a	26.60 ± 4.49 ab
	高N且N:P = 10:1 High level N and N:P = 10:1	T14	21.15 ± 2.42b	22.54 ± 6.32 b
	高N且N:P = 20:1 High level N and N:P = 20:1	T15	27.12 ± 4.47a	27.63 ± 11.97 a

同一施肥处理中字母不同表示数据差异显著 ($P < 0.05$)。

Different letters in the same treatment mean significant differences at 0.05 level.

内的刨花楠在不同季节叶片N、P再吸收效率也存在显著差异 ($P < 0.05$) (单施P除外) (表1、表2)。

2.1 N、P喷施对刨花楠叶片N、P再吸收效率的影响

N、P喷施对刨花楠叶片N再吸收效率具有显著影响 ($P < 0.05$)。

单施N会降低叶片N再吸收效率。单施P时, T4 (低P) 处理显著降低叶片N再吸收效率, 但随着P肥施用量的增加, N再吸收效率会提高。低N且N、P配施处理时, 随着配施N:P的增大, 叶片N再吸收效率逐渐降低; 在中N且N、P配施时, 以T11 (中N且N:P = 10:1) 处理的叶片N再吸收效率最高; 在高N且N、P配施时, 以T15 (高N且N:P = 20:1) 处理的叶片N再吸收效率最高 (表1)。

除低N且N、P配施与中N且N、P配施外, 其余喷施处理对叶片P再吸收效率有显著影响 ($P < 0.05$)。在单施N处理组, 以T2 (中N) 处理的叶片P再吸收效率最高。在单施P处理组, 以T5 (中P) 处理的叶片P再吸收效率最高, 但与对照 (CK) 无显著差异。在低N且N、P配施处理组, 以T7 (低N且N:P = 5:1) 处理的叶片P再吸收效率最高; 在中N且N、P配施处理组, 以T11 (中N且N:P = 10:1) 处理的叶片P再吸收效率最高, 与对照 (CK) 无显著差异; 在高N且N、P配施处理组, 以T15 (高N且N:P = 20:1) 处理的叶片P再吸收效率最高 (表1)。

2.2 不同季节对刨花楠叶片N、P再吸收效率的影响

同一处理组内不同季节刨花楠叶片N、P再吸收效率存在显著差异 ($P < 0.05$) (单施P除外)。

各处理组内, 3个季节 (即6月、9月与12月) 叶片N再吸收效率均以6月最高。在单施N, 低N且N、P配施与中N且N、P配施3个处理组内, 3个季节叶片N再吸收效率均表现为6月>9月>12月; 但在单施P与高N且N、P配施2个处理组内, 叶片N再吸收效率则表现为6月>12月>9月 (表2)。

各处理组内, 3个季节叶片P再吸收效率除单施P (以12月最高) 和低N且N、P配施 (以9月最高) 两处理组外, 其余3个处理组均以6月最高。在单施N, 中N且N、P配施与高N且N、P配施3个处理组内, 3个季节叶片P再吸收效率均表现为6月>9月>12月; 在单施P处理组内, 3个季节叶片P再吸收效率则表现为12月>6月>9月, 但各季节间差异不显著; 在低N且N、P配施处理组内, 叶片P再吸收效率则表现为9月>6月>12月 (表2)。

表2 不同季节刨花楠叶片N、P再吸收效率的差异比较

Table 2 Leaf N and P resorption efficiency in different seasons

处理组 Treatment	月份 Month	N再吸收效率 (r/%) N resorption efficiency	P再吸收效率 (r/%) P resorption efficiency
单施N N addition	6	21.63 ± 4.48 a	29.26 ± 4.93 a
	9	15.60 ± 8.57 b	24.07 ± 3.49 a
	12	13.66 ± 2.01 b	19.16 ± 1.41 b
单施P P addition	6	22.32 ± 10.08 a	21.09 ± 6.63 a
	9	9.50 ± 4.32 c	18.36 ± 8.84 a
	12	21.47 ± 3.76 b	23.08 ± 10.67 a
低N且N、P配施 Low level N with N/P combined addition	6	24.17 ± 4.81 a	23.73 ± 7.99 b
	9	13.29 ± 7.03 b	29.13 ± 4.15 a
	12	12.87 ± 2.10 b	17.72 ± 2.92 c
中N且N、P配施 Medium level N with N/P combined addition	6	25.21 ± 5.26 a	30.15 ± 4.21 a
	9	21.03 ± 10.68 b	27.36 ± 4.71 a
	12	16.32 ± 2.61 c	17.47 ± 3.10 b
高N且N、P配施 High level N with N/P combined addition	6	26.36 ± 5.03 a	30.44 ± 11.70 a
	9	22.97 ± 3.72 b	24.54 ± 4.78 ab
	12	23.63 ± 2.42 b	21.79 ± 2.58 b

同一施肥处理中字母不同表示数据差异显著 ($P < 0.05$)。

Different letters in the same treatment mean significant differences at 0.05 level.

2.3 叶片N、P含量, 养分再吸收效率和N:P比之间的相关性分析

根外追肥后刨花楠叶片N、P含量, 养分再吸收效率和

表3 叶片N、P含量, 养分再吸收率和N:P比之间的相关性
Table 3 Correlation among leaf N and P content, resorption efficiency and N:P ratio

y-x	Equation	N	R ²	y-x	Equation	N	R ²
Nm-Pm	y = 11.117x + 8.2096	48	0.2184**	RE _N -Ns:Ps	y = -1.1446x + 46.599	48	0.0982*
Ns-Ps	y = 14.658x + 4.9935	48	0.4693**	RE _P -Pm	y = 29.511x + 2.2329	48	0.0559
Nm-Ns	y = 0.5552x + 9.0192	48	0.2774**	RE _P -Ps	y = -84.094x + 70.362	48	0.5046**
Pm-Ps	y = 0.4871x + 0.458	48	0.2638**	RE _P -Nm:Pm	y = -1.0057x + 46.298	48	0.0729
RE _N -Nm	y = 1.8711x - 11.178	48	0.1205*	RE _P -Ns:Ps	y = 0.7364x + 6.1772	48	0.0429
RE _N -Ns	y = -3.4802x + 65	48	0.3751**	RE _N -RE _P	y = 0.4752x + 8.0578	48	0.2141**
RE _N -Nm:Pm	y = 1.041x - 4.0373	48	0.0741				

Nm、Pm表示成熟新叶的N、P含量; Ns、Ps表示衰老叶的N、P含量; RE_N、RE_P分别表示N、P再吸收效率。 “*”表示 $P < 0.05$, “**”表示 $P < 0.01$ 。
Nm: N content of mature leaves; Pm: P content of mature leaves; Ns: N content of senesced leaves; Ps: P content of senesced leaves; RE_N: N resorption efficiency; RE_P: P resorption efficiency. “*” means $P < 0.05$, “**” means $P < 0.01$.

N:P比各变量之间的相关系数及回归方程如表3所示。

在成熟新叶与衰老叶内, 叶片N、P含量之间均呈现极显著正相关 ($P < 0.01$), 成熟新叶与衰老叶片间的N含量及P含量也均呈现出极显著正相关 ($P < 0.01$)。说明植物在生长过程中N、P元素协同变化, 共同影响着植物的生长。

叶片N再吸收效率与成熟新叶内N含量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 而与衰老叶内N含量则呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 说明刨花楠叶片在衰老过程中存在明显的N元素再吸收现象。叶片P再吸收效率与新叶内P含量间虽存在正相关, 但相关不显著 ($P > 0.05$), 但与衰老叶内P含量则呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与新叶及衰老叶内的N:P 则均相关不显著 ($P > 0.05$); 叶片N再吸收效率与P再吸收效率之间也呈现极显著正相关 ($P < 0.01$)。

3 讨论

刨花楠叶片N、P再吸收效率随根外追施不同梯度N、P肥的变化而变化。单施N时, 3种喷施处理后的叶片N再吸收效率均低于对照组, 与赵琼等的N添加显著降低兴安落叶松叶片的N再吸收效率结果^[18]一致, 表明根外追施N肥会增加林地的N归还量, 促进林地养分循环。Son等的研究也发现, 增施N、P肥会使日本落叶松 (*Larix japonica*) N再吸收效率提高, 但却使刚松 (*Pinus rigida*) 的N再吸收效率下降^[33]。叶片N再吸收效率对施肥的响应不同, 可能由于物种差异或环境因素 (如光照、水分等) 等引起。另有学者研究发现施肥对桉树 (*Eucalyptus robusta*) 叶片养分再吸收效率影响不显著^[20], 而本研究中不同N、P喷施处理对刨花楠叶片N再吸收效率有显著影响, 但对P再吸收效率的影响则较复杂, 这可能是由于试验地受P元素限制 (新、老叶叶片N:P均大于16)^[8, 34]及采用根外追肥方式造成。传统施肥方式是将肥料直接施用于土壤, 能够直接增加土壤P有效性, 植物通过根系吸收P运输到叶片及其他部位, 但P元素在土壤中移动性小, 不易被吸收。而本研究采用根外追肥, 直接将P肥喷洒于叶片, 通过叶片角质层和气孔吸收。刨花楠叶片呈现披针形, 由下部至先端渐次狭尖, 具有发达的角质层和孔下室, 易吸收喷洒在叶片表面的P元素, 因此P再吸收效率对根外追肥的响应机制也会随之变化。喷施N肥促进植物对P元素的吸收, 喷施P肥促进植物对N元素的吸收, 该结论与Graciano等分析叶片N、P再吸收效率对土壤追肥的响应所得出的结论^[35]相同。

除单施P处理组内的叶片P再吸收效率外, 不同季节的刨花楠叶片N、P再吸收效率存在显著差异 ($P < 0.05$), 各处理组生长季 (6-9月) 叶片N、P再吸收效率明显高于非生长季 (12月) (表2), 表明刨花楠叶片在生长季需要较多的N、P元素生成光合酶和ATP等, 以催化其叶片光合反应, 提高叶片光合速率。对于刨花楠而言, 其果期为6-7月, 生殖生长和营养生长争夺养分, 为了促进植物体的生长, 刨花楠叶片吸收的N、P元素含量要高于非生长季。

养分再吸收反映了植物对贫瘠立地条件的适应性^[36]。影响养分再吸收效率的因素有很多, 物种差异和不同程度的环境胁迫都会导致植物养分再吸收效率产生差异^[37-38]。本研究中刨花楠叶片N、P平均再吸收效率分别为20%、24%, 明显低于Aerts研究美国和欧洲不同树种所得出的平均养分再吸收效率N为50% ($N = 287$), P为52% ($N = 226$)^[32]以及Han等研究全球范围内不同生活型植物的N、P再吸收效率 (分别为56%和57%)^[39]。分析原因, 可能是与生长在自然环境下的树种相比, 根外追肥方式能使刨花楠叶片吸收较多的N、P元素, 养分有效性提高, 养分再吸收效率较之偏低, 即营养物有效性较低时的养分再吸收效率高于营养物有效性较高时的养分再吸收效率^[40]。本研究中刨花楠叶片N、P再吸收效率之间呈现显著线性正相关 (表3), 表明叶片对N、P元素的再吸收利用同步发生, 其原因可能是由于叶片对根外追肥的N、P养分吸收均较快, 且根外追施N、P肥可缓解土壤P限制所产生的不足。

我们通过不同梯度根外追肥处理及不同季节对刨花楠叶片N、P再吸收效率的影响研究, 发现, 施肥处理与季节都影响着其叶片N、P再吸收效率。在不同喷施处理中, 以高N且N、P配施处理组T15 (高N且N:P = 20:1) 喷施处理后的叶片N、P再吸收效率为最高, 分别为(27.12 ± 4.47)%、(27.63 ± 11.97)%; 对不同季节而言, 以高N且N、P配施处理后的6月份叶片N、P再吸收效率为最高, 分别为(26.36 ± 5.03)%、(30.44 ± 11.70)%; 开展刨花楠人工林经营活动时, 应根据刨花楠在不同季节的生长特性与需肥要求进行合理的施肥, 最大程度促进刨花楠个体生长。本研究可为开展亚热带常绿阔叶林的高效经营培育技术研究提供理论指导, 并为进一步开展根外追肥对其生理特性 (如酶活性、可溶性糖含量等) 影响研究等提供理论依据。

参考文献 [References]

- 康蒙, 谢一鸣, 许月, 徐艺露, 阎恩荣. 浙江天童植物叶片氮磷含量的群落内变异[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2013, 2: 20-49 [Kang M, Xie YM, Xu Y, Xu YL, Yan ER. Within-community variability of plant leaf N and P contents in Tian tong, Zhejiang Province [J]. *J East Chin norm Univ (Nat Sci)*, 2013, 2: 20-49]
- 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28 (8): 3937-3947 [Wang SQ, Yu GR. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28 (8): 3937-3947]
- Niklas JK. Plant allometry, leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry, and interspecific trends in annual growth rates [J]. *Ann Bot*, 2006, 97 (2): 155-163]
- 苏波, 韩兴国, 黄建辉, 渠春梅. 植物的养分利用效率(NUE)及植物对养分胁迫环境的适应策略[J]. 生态学报, 2000, 20 (2): 335-343 [Su B, Han XG, Huang JH, Qu CM. The nutrient use efficiency(NUE) of plants and its implications on the strategy of plant adaptation to nutrient stressed environments [J]. *Acta Ecol Sin*, 2000, 20 (2): 335-343]
- Killingbeck KT. Nutrients in senesced leaves: keys to the search for potential resorption and resorption proficiency [J]. *Ecology*, 1996, 77 (6): 1716-1727
- Aerts R. Nutrient use efficiency in evergreen and deciduous species from heathlands [J]. *Oecologia*, 1990, 84 (3): 391-397
- Santa RI, Rico M, Rapp M, Gallego HA. Seasonal variation in nutrient concentration in leaves and branches of *Quercus pyrenaica* [J]. *J Veg Sci*, 1997, 8 (5): 651-654
- 叶功富, 张立华, 林益明, 王亨, 周海超, 曾琦. 福建东山短枝木麻黄小枝氮磷含量及其再吸收率季节动态[J]. 生态学报, 2009, 29 (12): 6519-6526 [Ye GF, Zhang LH, Lin YM, Wang H, Zhou HC, Zeng Q. Seasonal dynamics of nitrogen and phosphorus concentrations, and nutrient resorption efficiencies of *Casuarina equisetifolia* branchlets in Dongshan County, Fujian [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, 29 (12): 6519-6526]
- 陈欣, 宇万太, 张璐, 殷秀岩, 沈善敏. 不同施肥杨树主要营养元素内外循环比较研究II. 施肥对落叶前后杨树叶片营养元素浓度及贮量的影响[J]. 应用生态学报, 1995, 6 (4): 346-348 [Chen X, Yu WT, Zhang L Yin XY, Shen SM. Comparative study on internal and external nutrient cyclings of poplar tree under different fertilizations II. Effect of fertilization on concentration and storage of major nutrients in popular leaves before and after leaf fallen [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1995, 6 (4): 346-348]
- 沈善敏, 宇万太, 张璐, 廉鸿志. 杨树主要营养元素内循环及外循环研究 I. 落叶前后各部位养分浓度及养分贮量变化[J]. 应用生态学报, 1992, 3 (4): 296-301 [Shen SM, Yu WT, Zhang L, Lian HZ. Internal and external nutrient cyclings of poplar tree I. Changes of nutrient storage in different parts of poplar tree before and after fallen [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1992, 3 (4): 296-301]
- 沈善敏, 宇万太, 张璐, 廉鸿志. 杨树主要营养元素内循环及外循环研究 II. 落叶前后养分在植株体内外的迁移和循环[J]. 应用生态学报, 1993, 4 (1): 27-31 [Shen SM, Yu WT, Zhang L, Lian HZ. Internal and external nutrient cyclings of poplar tree II. Transferring and cycling of nutrients in and out of the tree before and after leaf fallen [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1993, 4 (1): 27-31]
- 宇万太, 陈欣, 张璐, 殷秀岩, 沈善敏. 不同施肥杨树主要营养元素内外循环比较研究I. 施肥对杨树生物量及落叶前后N内外循环的影响[J]. 应用生态学报, 1995, 6 (4): 341-345 [Yu WT, Chen X, Zhang L, Yin XY, Shen SM. Comparative study on internal and external nutrient cyclings of poplar tree under different fertilizations I. Effect of fertilization on biomass of poplar tree and its internal and external cycling of N before and after leaf fallen [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1995, 6 (4): 341-345]
- 何维明, 张新时. 沙地柏对毛乌素沙地3种生境中养分资源的反应[J]. 林业科学, 2002, 38 (5): 1-6 [He WM, Zhang XS. Response of *Sabina vulgaris* to nutrient responses in the contrasting habitats in the Mu Us sandland [J]. *Sci Sil Sin*, 2002, 38 (5): 1-6]
- 曾德慧, 陈广生, 陈伏生, 赵琼, 冀小燕. 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 DH, Chen GS, Chen FS, Zhao Q, Ji XY. Foliar nutrient and their resorption efficiencies in four *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations of different ages on sandy soil [J]. *Sci Sil Sin*, 2005, 41 (5): 21-27]
- 郭盛磊, 阎秀峰, 白冰, 于爽. 供氮水平对落叶松幼苗光合作用的影响[J]. 生态学报, 2005, 25 (6): 1291-1298 [Guo SL, Yan XF, Bai B, Yu S. Effects of nitrogen supply on photosynthesis in larch seedlings [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, 25 (6): 1291-1298]
- 赵中华, 郭晓敏, 李发凯, 汪洪雨, 张斌, 程磊, 刘亮英, 乔婧芬. 不同施肥处理对油茶光合生理特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2007, 29 (4): 576-581 [Zhao ZH, Guo XM, Li FK, Wang HL, Zhang B, Cheng L, Liu LY, Qiao JF. Effects of different fertilizing Treatment on the photo-biological Characters in Oil-tea [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2007, 29 (4): 576-581]
- 赵燕, 董雯怡, 张志毅, 李吉跃, 聂立水, 沈应柏. 施肥对毛白杨杂种无性系幼苗生长和光合的影响[J]. 林业科学, 2010, 46 (4): 70-77 [Zhao Y, Dong WY, Zhang ZY, Li JY, Nie LS, Shen YB. Effects of fertilization on seedling growth and photosynthesis of hybrid clone seedlings of *Populus tomentosa* [J]. *Sci Sil Sin*, 2010, 46 (4): 70-77]
- 赵琼, 刘兴宇, 胡亚林, 曾德慧. 氮添加对兴安落叶松养分分配和再吸收效率的影响[J]. 林业科学, 2010, 46 (5): 14-19 [Zhao Q, Liu XY, Hu YL, Zeng DH. Effects of nitrogen addition on nutrient allocation and nutrient resorption efficiency in *Larix gmelinii* [J]. *Sci Sil Sin*, 2010, 46 (5): 14-19]
- 樊后保, 李燕燕, 刘文飞, 黄荣珍, 袁颖红, 苏兵强, 廖迎春. 连续年龄序列尾巨桉人工林养分循环[J]. 应用与环境生物学报, 2012, 18 (6): 897-903 [Fan HB, Li YY, Liu WF, Huang RZ, Yuan YH, Su BQ, Liao YC. Nutrient accumulation and cycling of an *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2012, 18 (6): 897-903]
- 理永霞, 茶正早, 罗微, 林钊沐, 贝美蓉. 3种桉树幼苗叶片养分变化及其转移特性[J]. 林业科学, 2009, 45 (1): 152-157 [Li YX, Cha ZZ, Luo W, Lin ZM, Bei MR. Dynamics and transfer of nutrients in the seedling leaves of three eucalyptus varieties [J]. *Sci Sil Sin*, 2009, 45 (1): 152-157]
- 孙映波, 操君喜, 尤毅, 吕复兵, 朱根发, 李冬梅, 陈和明. 不同施肥方式对文心兰生长及光合生理特征的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27 (22): 119-124 [Sun YB, Cao JX, You Y, Lv FB, Zhu GF, Li DM, Chen HM. Effects of different fertilizing methods on growth and photosynthetic physiology of *Oncidium* [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2011, 27 (22): 119-124]
- 史彦江, 吴正保, 哈地尔·依沙克, 宋锋惠. 叶面喷施肥料和生长调节剂对阿克苏市骏枣的产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012 (6): 66-69 [Shi YJ, Wu ZB, Hadier ·Y, Song FH. Effects of foliage fertilizer and growth regulators material on yield and quality of *Ziziphus*

- jujuba* Mill. cv. Junzao' in Aksu city [J]. *Soil Fert Sci Chin*, 2012 (6): 66-69]
- 23 陈巍, 黄品湖, 郭秀珠, 徐文荣, 林绍生. 几种叶面肥对油桃果实品质和色素的影响. 中国南方果树, 2011, **40** (5): 62-63 [Chen W, Huang PH, Guo XZ, Xu WR, Lin SS. The effect of several kinds of foliar fertilizer on the quality and pigment of nectarine [J]. *S Chin Fruits*, 2011, **40** (5): 62-63]
 - 24 钟全林, 胡松竹, 黄志强, 程建华, 肖水清. 刨花楠生长特性及其生态因子影响分析[J]. 林业科学, 2002, **38** (2): 165-168 [Zhong QL, Hu SZ, Huang ZQ, Cheng JH, Xiao SQ. Growth characters and effects of ecological factors on *Machilus pauhoi* [J]. *Sci Sil Sin*, 2002, **38** (2): 165-168]
 - 25 徐朝斌, 钟全林, 程栋梁, 胡松竹, 常云妮, 张治, 胡波. 基于 C^2H 和 D^2H 的刨花楠幼苗生物量回归模型比较[J]. 华南农业大学学报, 2013, **34** (4): 543-547 [Xu CB, Zhong QL, Cheng DL, Hu SZ, Chang YN, Zhang Z, Hu B. Comparison of the regression models of *Machilus pauhoi* biomass based on C^2H and D^2H [J]. *J S Chin Agric Univ*, 2013, **34** (4): 543-547]
 - 26 鲁美娟, 江洪, 李巍, 余树全, 曾波, 蒋馥蔚, 李佳, 金清. 模拟酸雨对刨花楠幼苗生长和光合生理的影响[J]. 生态学报, 2009, **29** (11): 5986-5994 [Lu MJ, Jiang H, Li W, Yu SQ, Zeng B, Jiang FW, Li J, Jin Q. Effect of simulated acid rain on growth and photosynthetic physiology of *Machilus pauhoi* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29** (11): 5986-5994]
 - 27 程栋梁, 靳冰洁, 徐朝斌, 马玉珠, 钟全林. 年龄对刨花楠胸径生长速率的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2013, **40** (1): 28-31 [Cheng DL, Jin BJ, Xu CB, Ma YZ, Zhong QL. Effects of stand age on stem-diameter growth of *Machilus pauhoi* [J]. *J Anhui Agric Univ*, 2013, **40** (1): 28-31]
 - 28 钟全林, 程栋梁, 胡松竹, 贺利中, 唐承财, 文雅香, 邱剑飞, 李秀花. 刨花楠和华东润楠叶绿素含量分特征及与净光合速率的关系[J]. 应用生态学报, 2009, **20** (4): 271-276 [Zhong QL, Chen DL, Hu SZ, He LZ, Tang CC, Wen YX, Qiu JF, Li XH. Chlorophyll content and net photosynthetic rate of *Machilus pauhoi* and *M. leptophylla* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2009, **20** (4): 271-276]
 - 29 陈国彪. 刨花楠的利用与培育技术[J]. 广西林业科学, 2004, **33** (4): 212-213 [Chen GB. The use and cultivation technology of *Machilus pauhoi* [J]. *Guangxi For Sci*, 2004, **33** (4): 212-213]
 - 30 潘汉奇. 刨花楠扦插育苗技术[J]. 吉林农业, 2013, **6**: 196-197 [Pan HQ. The cuttings and seedlings technology of *Machilus pauhoi* [J]. *Jilin Agric*, 2013, **6**: 196-197]
 - 31 史瑞和. 土壤农化分析[M]. 2版. 北京: 农业出版社, 1992 [Shi RH. Soil agricultural chemistry analysis [M]. 2nd ed. Beijing: Agricultural Publishing House, 1992]
 - 32 Aerts R. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns? [J]. *J Ecol*, 1996, **84** (4): 597-608
 - 33 Son Y, Lee LK, Ryu SR. Nitrogen and phosphorus dynamics in foliage and twig of pitch pine and Japanese larch plantations in relation to fertilization [J]. *J Plant Nutr*, 2000, **23**: 697-710
 - 34 Koerselman W, Meuleman A FM. The vegetation N: P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. *J Appl Ecol*, 1996, **33** (6): 1441-1450
 - 35 Graciano C, Goya JF, Frangi JL, Guamet JJ. Fertilization with phosphorus increases soil nitrogen absorption in young plants of *Eucalyptus grandis* [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **236**: 202-210
 - 36 Aerts R, Cornelissen JHC, Logtestijn van RSP, Callaghan, TV. Climate change has only a minor impact on nutrient resorption parameters in a high-latitude peatland [J]. *Oecologia*, 2007, **151** (1): 132-139
 - 37 王文卿, 林鹏. 树木叶片衰老过程中养分元素内吸收研究[J]. 武汉植物学研究, 1999 (Suppl): 117-122 [Wang WQ, Lin P. Studies on the nutrient retranslocation efficiencies during leaf senescence [J]. *J Wuhan Bot Res*, 1999 (Suppl): 117-122]
 - 38 吴锡麟, 叶功富, 张尚炬, 林益明, 张立华. 不同海岸梯度上短枝木麻黄小枝金属元素含量及其再吸收率动态[J]. 应用与环境生物学报, 2011, **17** (5): 645-650 [Wu XL, Ye GF, Zhang SJ, Lin YM, Zhang LH. Contents of some mineral elements and their resorption efficiencies in *Casuarina equisetifolia* branchlets across a coastal gradient [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2011, **17** (5): 645-650]
 - 39 Han WX, Tang LY, Chen YH, Fang JY. Relationship between the relative limitation and resorption efficiency of nitrogen vs phosphorus in woody plants [J]. *Plos ONE*, 2013, **8** (12): 1-11
 - 40 Pugnaire FI, Chapin III FS. Environmental and physiological factors governing nutrient resorption efficiency in barley [J]. *Oecologia*, 1992, **90**: 120-126