

网络出版时间:2023-02-10 08:34

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2023.08.009

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail//61.1390.S.20230209.1622.006.html

郭岩山不同海拔丝栗栲叶片养分回收特征分析

苏 仪¹, 张 豪¹, 何冬梅¹, 张捷发², 郑丽英², 王宇超¹,
刘丹萍¹, 钟兆全², 靳少非³, 郑德祥¹

(1 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2 顺昌县国有林场, 福建 顺昌 353200;

3 闽江学院 地理与海洋学院, 福建 福州 350108)

[摘 要] 【目的】研究郭岩山自然保护区不同海拔丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)天然林分的叶片(鲜叶和凋落叶)养分元素含量和回收率随海拔的变化特征,以期进一步了解丝栗栲养分元素循环机理和对环境的适应特性,为丝栗栲等亚热带常绿阔叶树种培育及外源养分调控提供参考。【方法】采集郭岩山自然保护区不同海拔(600~900 m)丝栗栲天然林的鲜叶和凋落叶,测定其氮(N)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)含量,并计算其回收率,采用皮尔逊(Pearson)相关分析探究不同海拔叶片养分元素之间的相关性。【结果】① 海拔对丝栗栲鲜叶 N、K、Ca、Mg 元素含量和凋落叶 N、Ca、Mg 元素含量存在明显影响,凋落叶除 Ca 元素含量高于鲜叶外,其余元素含量均低于鲜叶;② 相关性分析表明,在鲜叶中,K 与 P 元素含量呈极显著正相关($P<0.01$),与 Mg 元素含量呈显著负相关($P<0.05$);而在凋落叶中,Mg 元素含量与 N 和 Ca 元素含量之间存在显著和极显著正相关关系,K 元素含量与 Ca 和 Mg 元素含量均存在显著负相关关系($P<0.05$);③ 丝栗栲鲜叶与凋落叶间,Mg 元素含量呈极显著负相关($P<0.01$),N、K、Ca 元素含量均呈极显著正相关($P<0.01$),P 元素含量相关性不显著($P>0.05$);④ N、K、Mg 元素回收率受海拔影响显著,N 和 Mg 元素回收率在 800 和 900 m 海拔处较低,K 元素与之相反,P 元素在不同海拔均具有较高回收率,而 Ca 元素不具有回收特征。【结论】丝栗栲叶片不同养分元素含量随海拔的变化存在差异且具有一定相关关系,在不同海拔条件下,丝栗栲叶片会对除 Ca 元素以外的 N、P、K、Mg 4 种养分元素予以回收,但回收率表现特征不同,在森林经营过程中可据此因地制宜控制 N 肥施用及改良元素配比,以满足林木生长发育需要。

[关键词] 丝栗栲;养分回收;森林经营;海拔;郭岩山自然保护区

[中图分类号] S792.17

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2023)08-0076-08

Analysis on nutrient recovery characteristics of *Castanopsis fargesii* leaves at different altitudes in Guoyan Mountain

SU Yi¹, ZHANG Hao¹, HE Dongmei¹, ZHANG Jiefa², ZHENG Liying², WANG Yuchao¹,
LIU Danping¹, ZHONG Zhaoquan², JIN Shaofei³, ZHENG Dexiang¹

(1 College of Forestry, Fujian Agricultural and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;

2 State-owned Forest Farm of Shunchang, Shunchang, Fujian 353200, China;

3 College of Geography and Oceanography, Minjiang University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: 【Objective】The variation characteristics of leaf (fresh leaf and litter leaf) nutrient contents and recovery rates of *Castanopsis fargesii* natural forest at different altitudes in Guoyan Mountain natural reserve were studied to further understand the nutrient cycling mechanism and environmental adaptation characteristics of *Castanopsis fargesii* and to provide references for the cultivation and exogenous nutrient

[收稿日期] 2022-05-20

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(32071760);福建农林大学科技创新专项基金项目(KHF170002)

[作者简介] 苏 仪(1998—),女,福建龙海人,硕士,主要从事森林可持续经营研究。E-mail:1424088016@qq.com

[通信作者] 郑德祥(1975—),男,福建仙游人,副教授,博士生导师,主要从事森林可持续经营研究。E-mail:fjzdx@126.com

regulation of subtropical evergreen broad-leaved tree species. 【Method】 Fresh and litter leaves of *Castanopsis fargesii* natural forest at different altitudes (600—900 m) in Guoyan Mountain natural reserve were collected. The contents of nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg) in fresh and litter leaves were determined and the recovery rates were calculated. Pearson correlation analysis was used to analyze the correlation of nutrient elements in leaves at different altitudes. 【Result】 ① Altitude had significant effects on contents of N, K, Ca and Mg in fresh leaves and N, Ca and Mg in litter leaves of *Castanopsis fargesii*. Contents of elements in litter leaves were lower than those in fresh leaves, except Ca content was opposite. ② Correlation analysis showed that there was an extremely significant positive correlation between K and P ($P < 0.01$) and a significant negative correlation between K and Mg ($P < 0.05$) in fresh leaves. In litter leaves, Mg had a significant and extremely significant positive correlation with N and Ca, and K had a significant negative correlation with Ca and Mg ($P < 0.05$). ③ Between fresh and litter leaves of *Castanopsis fargesii*, Mg contents showed extremely significant negative correlation ($P < 0.01$), N, K and Ca contents had extremely significant positive correlation, while P contents had no significant correlation ($P > 0.05$). ④ The recoveries of N, K and Mg were significantly affected by altitude. The recoveries of N and Mg were lower at altitudes of 800 and 900 m, while K recoveries were on the contrary. P recoveries had higher rates at all altitudes, while Ca had no recovery. 【Conclusion】 The contents of different nutrient elements in *Castanopsis fargesii* leaves varied with altitude and had certain correlations. At different altitudes, *Castanopsis fargesii* leaves recovered N, P, K and Mg except Ca with different recovery characteristics. In the process of forest management, the application of N fertilizer and improved element ratios can be controlled according to local conditions to meet forest growth and development.

Key words: *Castanopsis fargesii*; nutrient recovery; forest management; altitude; Guoyan Mountain natural reserve

近年来,随着全球气候变暖,森林植被逐渐北迁,林线上移,环境对于植物生长的影响受到更多关注。植物体内各种养分元素的维持是植物生长发育与适应环境的基础,养分回收是植物通过养分元素的内吸收,将植物养分从衰老叶片转移到植物其他组织或器官的过程。作为植物对养分贫瘠环境的一种适应机制,养分回收会减少植物对环境中养分的依赖,提高其对养分贫瘠环境的适应性,对缓解养分从生态系统中流失具有重要意义^[1]。叶片是植物对环境变化最为敏感的器官,叶片养分元素含量作为植物对养分资源的吸收、利用和保持相关的生理指标^[2],叶片养分回收率能够反映植物对不同环境的适应及植物对环境做出的反应策略。海拔作为引起环境条件改变的主要原因之一^[3],随着海拔升高,温度、大气压强、土壤理化性质均会发生改变,进而促使植物产生不同的适应性特征。已有研究表明,在不同海拔梯度下叶片养分回收率会产生一定变化来适应环境^[4],因此可通过研究植物叶片养分回收特征与海拔的关系来反映其对环境变化的响应。蔡琴等^[5]对青藏高原东缘主要针叶树种叶片 N、P 回收效率的研究表明,植物通过提高叶片回收率降低生

长过程中对土壤养分限制的依赖;白坤栋等^[6]调查了广西猫儿山不同海拔常绿和落叶树种成熟叶和衰老叶 N、P 含量及其回收率,结果表明不同海拔常绿和落叶树种 N、P 再吸收模式有差异,可能是广西猫儿山常绿树种双峰分布的原因之一。但目前关于养分回收的研究主要集中在 N、P 常见元素上,而对于除 N、P 元素外的其他植物必要元素的养分回收对海拔变化的响应特征及其相互关系尚未见报道。

丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)也称栲树、红背锥栗,为壳斗科常绿乔木^[7],是亚热带常绿阔叶常见树种之一。丝栗栲在我国南方分布较广,是常绿阔叶林生态系统的重要组成部分,具有较高的经济、社会、生态及科学研究价值,但其养分回收对环境适应性方面的研究目前还处于空白阶段。基于此,本研究以顺昌县郭岩山自然保护区丝栗栲天然群落为对象,采集 600~900 m 海拔处的丝栗栲鲜叶和凋落叶,对其多种必要元素含量进行定量分析,分析不同海拔丝栗栲养分元素之间的回收机制,以期进一步了解丝栗栲养分元素循环机理和对环境的适应性,为丝栗栲等亚热带常绿阔叶树种培育及外源养分调控提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

郭岩山自然保护区坐落于福建省南平市顺昌县(27°06′—27°18′ N,118°00′—118°30′ E),地属南平市与三明市的交界地带,主峰高达 1 383.7 m,是顺昌县第一高峰,地处亚热带地区,属海洋性季风气候,土壤类型以黄红壤(500~700,900~1 000 m)和黄棕壤(700~900 m)为主。海拔 500 m 以下主要为人工杉木林;从海拔 500 m 处起由人工林逐步向天然林过渡;海拔 600~900 m 为天然林,主要树种为丝栗栲、木荷(*Schima superba*)、锥栗(*Castanea*

henryi)和马尾松(*Pinus massoniana*)等,其中丝栗栲为主要建群树种;海拔 1 000 m 以上以肿节少穗竹(*Oligostachyum oedogonatum*)及其他乔灌群落为主,而高大乔木仅有零星分布。

1.2 样地设置

根据郭岩山自然保护区内丝栗栲分布情况,在 600~900 m 海拔内每 100 m 海拔梯度采用随机抽样采样法布设样地,每个海拔梯度设立 5 个 30 m×30 m 的样地,采用相邻网格法将样地平均分为 36 个 5 m×5 m 的小样方,对每个小样方中胸径≥5 cm 的植株进行每木调查,样地基本概况详见表 1。

表 1 样地基本概况
Table 1 Basic characteristics of sample plots

海拔/m Altitude	林分特征 Stand characteristics			土壤特征 Soil characteristics		
	平均胸径/cm Average DBH	平均树高/m Average height	林分密度/(株·hm ⁻²) Stand density	全碳/(mg·g ⁻¹) Total C	全氮/(mg·g ⁻¹) Total N	全磷/(mg·g ⁻¹) Total P
600	13.3±1.12	12.0±1.98	450±32	23.33±9.51	1.89±0.61	0.44±0.14
700	15.1±0.98	13.5±1.55	338±16	20.21±10.62	1.73±0.70	0.26±0.08
800	13.9±2.28	11.0±1.12	381±21	28.52±12.21	2.43±1.19	0.43±0.14
900	12.5±0.91	10.5±1.22	300±15	35.76±10.58	4.31±1.31	0.33±0.19

1.3 样品采集

新鲜叶片采集:用高枝剪在各海拔梯度的每个样地内随机选取 5 株生长状况良好、属性基本一致的丝栗栲,每株摘取健康鲜叶 20~30 片,叶片采集高度尽可能保持一致,然后将每块样方采集的叶片混合放入自封袋,填写相关信息。凋落叶采集:围绕每株丝栗栲在胸径处设立网兜,自鲜叶采集 1 个月后,每株采集凋落叶 20~30 片,将每块样方内采集的凋落叶混合放入自封袋。收集的叶片样本用清水冲洗后再用去离子水清洗,烘干后备用。

1.4 测定指标及方法

通过查阅文献,结合南方植物营养元素特性,选择氮(N)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)5 种元素作为本研究植物元素指标。将采集叶片于 75 ℃下烘干至恒质量,研磨后过孔径 1 mm 筛网,采用湿灰化法(硝酸-高氯酸消煮法)^[8]进行消煮后,用电感耦合等离子体发射光谱仪(PE Optima 8000, PerkinElmer, America)测定鲜叶和凋落叶的 P、K、Ca、Mg 4 种元素含量,N 元素含量用碳氮元素分析仪(Vario MAX, Elementa, Germany)测定。

1.5 叶片养分回收率计算

目前,国际上对养分回收率计算有两种表达方式,一是基于质量水平,即单位叶干质量所含元素质量;二是基于面积水平,即单位叶面积所含元素质

量。因凋落叶面积难以测量,且脱落过程中面积有所缩小。因此,本研究参考 Lü 等^[9]和 Aerts 等^[10]的方法基于质量水平计算叶片养分回收率。养分回收率的计算公式为:

$$\text{NuRE} = (\text{Nugr} - \text{Nusen}) / \text{Nugr} \times 100\%$$

式中:NuRE 为叶片养分回收率,%;Nugr 为鲜叶中元素含量,g/kg;Nusen 为凋落叶中元素含量,g/kg。

1.6 数据处理

采用 Excel 2019 软件对试验数据进行初步处理,运用 SPSS 25.0 软件的单因素方差分析(One-way ANOVA)对丝栗栲叶片不同组分元素含量和回收率的海拔变化特征进行分析,并利用最小显著差异法(LSD)进行多重比较,通过皮尔逊(Pearson)相关分析进行不同海拔叶片元素之间的相关性检验;采用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

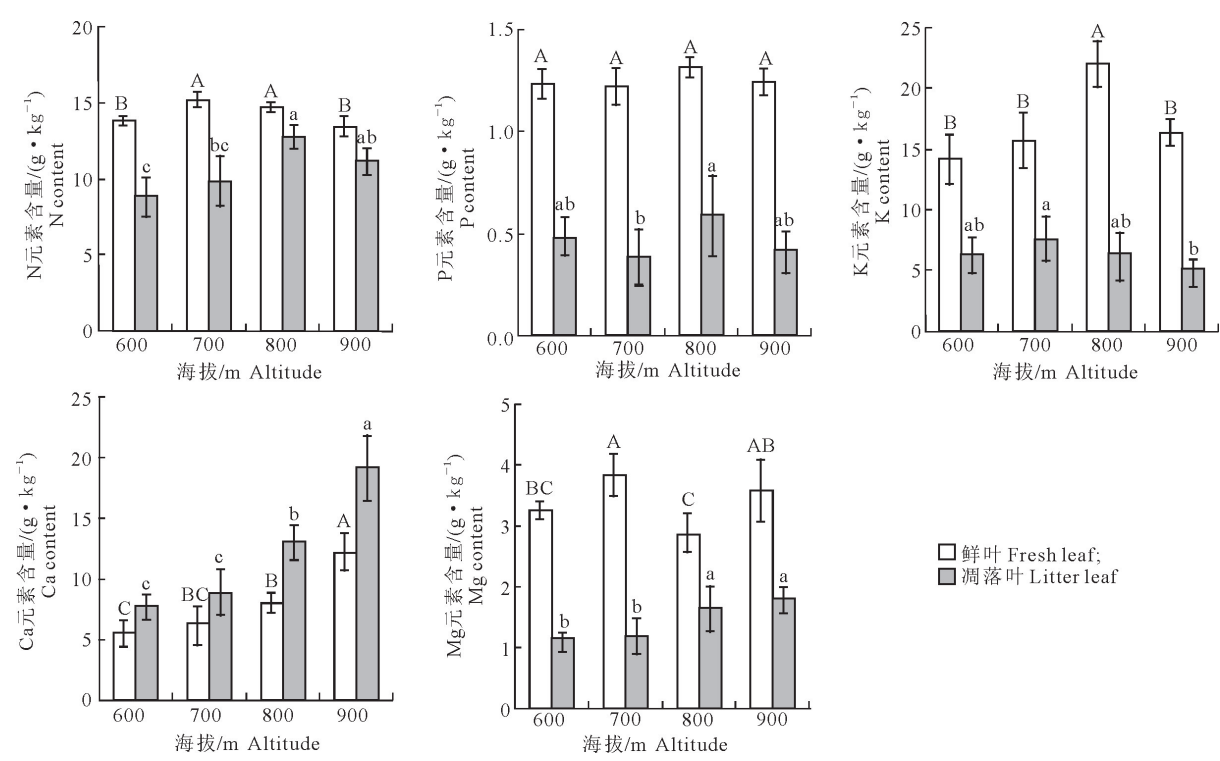
2.1 不同海拔丝栗栲鲜叶和凋落叶养分元素含量的变化特征

丝栗栲鲜叶和凋落叶 N、P、K、Ca、Mg 元素含量在各海拔梯度上的变化如图 1 所示。由图 1 可知,海拔对丝栗栲鲜叶 N、K、Ca、Mg 元素含量及凋落叶 N、Ca、Mg 元素含量存在明显影响。鲜叶各养

分元素含量随海拔的变化特征表现为:N元素含量在700和800 m海拔处显著高于600和900 m海拔处($P<0.05$);P元素含量在各海拔间均不存在显著差异($P>0.05$);K元素含量在800 m海拔处显著高于其他海拔处($P<0.05$),其余海拔间均不存在显著差异($P>0.05$);Ca元素含量在900 m海拔处显著高于其他海拔处($P<0.05$),600与800 m海拔处也存在显著差异($P<0.05$);Mg元素含量在700和900 m海拔处显著高于800 m海拔处,700 m海拔处与800和600 m海拔处均存在显著差异($P<0.05$),900与800 m海拔处也存在显著差异

($P<0.05$)。

由图1还可知,凋落叶各养分元素含量中,各海拔中除Ca元素含量高于鲜叶外,其余4种元素含量均低于鲜叶。N元素含量在800 m海拔处高于其他海拔处,并与600和700 m海拔处存在显著差异($P<0.05$),600与900 m海拔处也存在显著差异($P<0.05$);P和K元素含量仅分别在700与800 m、700与900 m海拔间存在显著差异($P<0.05$);Ca元素含量变化特征与鲜叶相似,随海拔升高,Ca元素含量显著增加;Mg元素含量在600,700 m与800,900 m海拔间存在显著差异($P<0.05$)。



图柱上标不同大写字母表示各海拔鲜叶养分元素含量之间存在显著差异($P<0.05$);不同小写字母表示各海拔凋落叶养分元素含量之间存在显著差异($P<0.05$)

Different capital letters indicate significant differences among contents of nutrient elements in fresh leaves at different altitudes ($P<0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences among contents of nutrient elements in litter leaves at different altitudes ($P<0.05$)

图1 丝栗栲鲜叶和凋落叶养分元素含量随海拔的分布特征

Fig.1 Distribution of nutrient element contents in fresh and litter leaves of *Castanopsis fargesii* at different altitudes

2.2 丝栗栲鲜叶和凋落叶养分元素含量的相关性分析

丝栗栲鲜叶和凋落叶养分元素含量相关性分析结果如表2所示。由表2可知,不同元素含量在鲜叶和凋落叶中的相关关系存在一定差异。在鲜叶中,P与K元素含量呈极显著正相关关系($P<0.01$),K和Mg元素含量具有显著负相关关系($P<0.05$),其余元素含量之间相关性均不显著($P>0.05$)。在凋落叶中,N与Mg元素含量之间呈现显著正相关($P<0.05$),K与Ca、Mg元素含量均呈显著负相关($P<0.05$),Ca与Mg元素含量呈极显著正相关($P<0.01$)。

同一元素含量在鲜叶与凋落叶间的相关关系如图2所示。由图2可知,Mg元素含量在丝栗栲鲜叶与凋落叶间存在极显著负相关关系($P<0.01$);P元素含量在丝栗栲鲜叶与凋落叶间不存在显著相关关系;N、K和Ca元素含量在丝栗栲鲜叶与凋落叶间均具有极显著正相关关系($P<0.01$)。

表 2 丝栗栲鲜叶和凋落叶中养分元素含量的相关性

Table 2 Correlation of nutrient elements in fresh and litter leaves of *Castanopsis fargesii*

项目 Item	N	P	K	Ca	Mg
N		0.416	−0.069	0.410	0.496 *
P	0.094		−0.208	−0.006	0.186
K	0.253	0.750 **		−0.514 *	−0.560 *
Ca	−0.404	0.022	0.125		0.794 **
Mg	0.203	−0.236	−0.451 *	0.120	

注:1. 左下角为鲜叶养分元素含量间的相关系数, 右上角为凋落叶养分元素含量间的相关系数。
2. ** 表示相关性极显著($P<0.01$); * 表示相关性显著($P<0.05$)。
Note:1. Lower left corner values are the correlations between contents of nutrient elements in fresh leaves, and the upper right corner values are the correlations between contents of nutrient elements in litter leaves.
2. ** means extremely significant difference ($P<0.01$), * means significant difference ($P<0.05$).

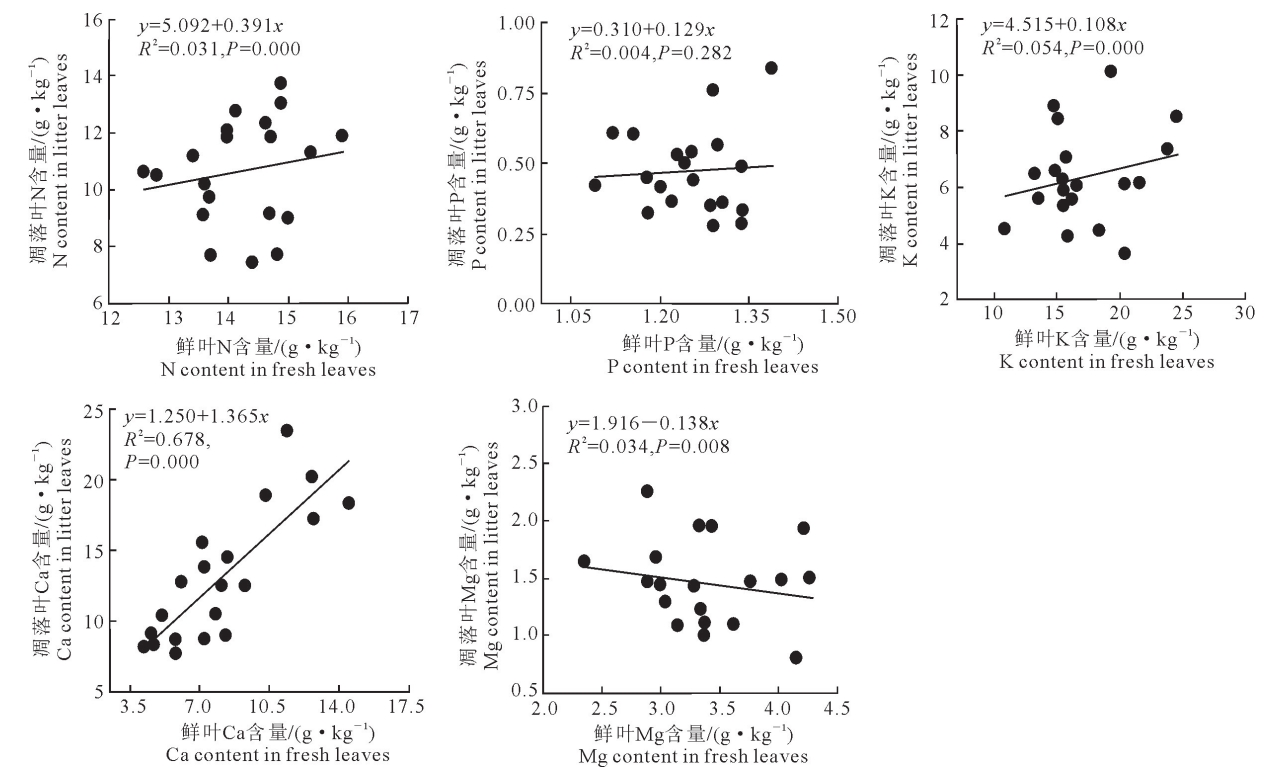


图 2 丝栗栲鲜叶与凋落叶养分元素含量的线性回归分析

Fig. 2 Linear regression analysis of nutrient elements between fresh and litter leaves of *Castanopsis fargesii*

2.3 不同海拔丝栗栲叶片养分元素回收率的变化 随海拔梯度表现出不同的变化规律,其方差分析结果见表 3。

特征

郭岩山自然保护区丝栗栲叶片养分元素回收率

表 3 海拔对丝栗栲叶片养分元素回收率影响的单因素方差分析

Table 3 One-way ANOVA on effect of altitude on recoveries of nutrient elements in *Castanopsis fargesii* leaves

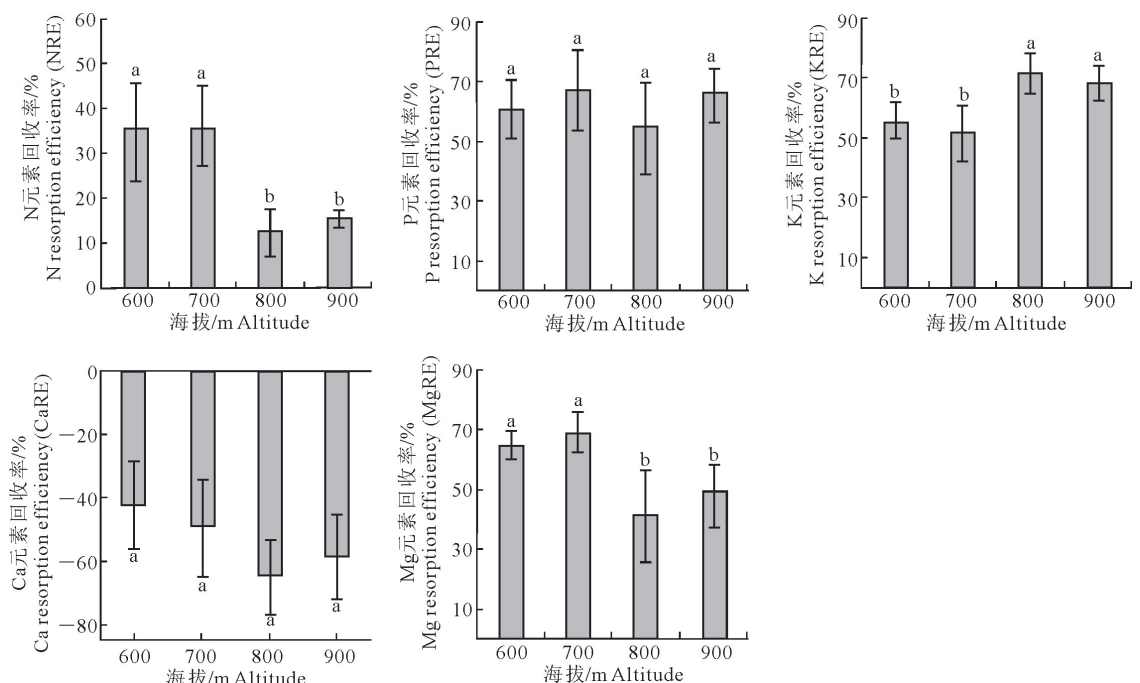
项目 Item	NRE	PRE	KRE	CaRE	MgRE
F	14.306	1.218	9.677	0.414	8.404
P	0.000 **	0.336	0.001 **	0.745	0.001 **

注:NRE、PRE、KRE、CaRE 和 MgRE 依次表示 N、P、K、Ca 和 Mg 元素回收率。 ** 表示相关性极显著($P<0.01$)。
Note:NRE、PRE、KRE、CaRE 和 MgRE represent N、P、K、Ca and Mg element recoveries in turn. ** means significant difference($P<0.01$).

由表 3 可知,海拔对丝栗栲叶片 N、K、Mg 元素回收率影响不显著。如图 3 所示,N 元素回收率在 600 和 700 m 海拔处显著高于 800 和 900 m 海拔处

($P<0.05$);P 元素回收率在不同海拔间无显著差异($P>0.05$),但均具有较高值;K 元素回收率在 800 和 900 m 海拔处显著高于 600 和 700 m 海拔处($P<0.05$);Mg 元素回收率在 600 和 700 m 海拔处显著高于 800 和 900 m 海拔处($P<0.05$),与 K 元

素回收率变化特征相反;各海拔处 Ca 元素回收率均为负值,且不同海拔间无显著差异($P>0.05$),表明 Ca 元素在各海拔丝栗栲生长过程中均不具有回收特性。



图柱上标不同小写字母表示不同海拔间差异显著($P<0.05$)

Different lowercase letters indicate significant differences at different altitudes ($P<0.05$)

图 3 丝栗栲叶片养分元素回收率随海拔的变化特征

Fig. 3 Variations of leaf nutrient recovery rates of *Castanopsis fargesii* leaves at different altitudes

3 讨 论

3.1 不同海拔丝栗栲叶片养分元素含量变化特征及相关性分析

营养元素在植物生长发育和逆境生长过程中均具有重要作用,通过对植物元素含量及相关关系进行分析,可探讨植物生长发育过程为适应环境进行的选择性吸收功能和元素的生物地球化学特征^[11]。本研究中,丝栗栲鲜叶 N、K、Ca、Mg 元素含量随海拔变化差异较大,P 元素含量则随海拔变化差异不显著。随着海拔升高,温度降低,影响了土壤微生物酶活性,进而影响土壤有效 N、P 元素含量^[12]。土壤有效 N、P 元素含量的共同限制作用导致丝栗栲对 N、P 元素的吸收降低^[13]。在大气 N 沉降条件下,植物 N 限制在一定程度上得到了缓解,而环境中 P 元素较为缺乏^[14],P 限制无法从外部获得补充缓解,因此丝栗栲鲜叶 N 元素含量在 700 和 800 m 海拔处显著高于其他海拔处,鲜叶 P 元素含量在不同海拔间差异不显著,这与杨蕾等^[15]的研究结果一

致。K、Ca 元素能够通过调节植物体内活性氧和细胞代谢,从而提高植物抗渍、抗寒和抗盐胁迫等能力^[16-19]。所以随着海拔上升,丝栗栲通过增加对 K 和 Ca 元素的吸收以提高其对低温胁迫的抗逆性,表现为 Ca 元素含量在 900 m 海拔处显著高于其他海拔处。K 元素由于具有较强移动性^[20-21],易遭受淋溶损失,在 900 m 海拔处降水增加时土壤有效 K 含量减少,于 800 m 海拔处显著高于其他海拔处。K⁺和 Mg²⁺在质膜上转运蛋白酶活位点存在一定的竞争关系,使得 K 和 Mg 元素既存在协同作用又存在拮抗关系^[17]。当环境中 K 元素含量较少时,将促进植物对 Mg 元素的吸收;当环境中 K 元素含量充足时,将抑制植物对 Mg 元素的吸收,两者产生竞争关系,表现出植物体内 Mg 元素的吸收与 K 元素含量呈负相关。本研究中 Mg 元素含量在 700 和 900 m 海拔处高于其他海拔处。由此可见,营养元素对丝栗栲生长发育和适应环境变化具有重要作用,在丝栗栲等亚热带常绿阔叶树种造林培育过程中应因地制宜,在较高海拔 N 沉降条件下,适度控制 N 肥施

用量,多施用富含 K、Ca 等元素的肥料,以增加植物抗逆性。

3.2 不同海拔丝栗栲叶片养分回收特征分析

养分回收是植物通过养分吸收成本调控对环境的一种适应性策略^[22-23],其回收过程与环境紧密相关^[24-25]。本研究结果显示,丝栗栲 N、P、K、Mg 4 种元素存在养分回收特征,Ca 元素不具有回收特性。受土壤 N 与大气 N 沉降富集的影响,随着海拔梯度上升,环境中 N 元素逐渐充足,降低了丝栗栲吸收 N 元素的相对成本,进而减少其从衰老叶回收 N 元素,即植物养分再利用率与环境养分含量呈负相关^[26-27],因此 N 元素回收率在 800 和 900 m 海拔处显著降低。而土壤中 P 元素相对缺乏,导致丝栗栲为自身生长保护策略在各海拔维持较高的回收率,这一结论符合养分限制控制假说^[27]。随海拔升高,温度降低,丝栗栲需调控体内养分元素以对抗逆境,基于生理需求和成本—收益策略^[28-29],较多从衰老叶转移养分元素到新鲜叶片和其他器官,减少了回归环境重新吸收的损失,所以不同海拔丝栗栲凋落叶 K、Mg 元素含量明显低于新鲜叶,K 元素的回收率表现为 800 和 900 m 海拔处显著高于其他海拔处;但对 Mg 元素而言,可能由于低温条件对体内 Mg 元素进行回收的成本高于从环境中直接吸收,因此 600 和 700 m 海拔处 Mg 元素回收率显著高于其他海拔处。丝栗栲 K 元素在不同海拔的养分回收率均值为 61.6%,与 Liu 等^[30]对中国西喀斯特不同植物的研究结果(63.2%)相似;Mg 元素回收率均值为 56.1%,远高于 Vergutz 等^[31]在全球尺度上的研究结果(28.6%)及张美霞^[28]对中国北方木本植物的研究结果(18.5%),且鲜叶与凋落叶 Mg 元素含量呈极显著负相关($P<0.01$),基于该环境下丝栗栲体内实际养分需求^[32],幼叶缺乏 Mg 元素,更多从凋落叶中回收 Mg 元素。Ca 作为重金属元素在叶片内移动性差,不具有回收特性,其随丝栗栲生长发育在老叶中堆积至掉落回归土壤参与森林生态系统养分循环^[33]。上述分析表明,丝栗栲会根据养分元素特性和所面临的环境胁迫而采取不同的养分回收策略,养分回收特征研究可揭示环境中养分元素的丰缺程度和植物对养分的需求特性,说明在实际的森林经营过程中,可以通过改良元素配比施肥等方式,补充外部环境中缺乏或难以循环再利用的元素,以满足林木生长发育。

4 结 论

本研究对郭岩山自然保护区不同海拔(600~

900 m)丝栗栲天然林分的叶片(鲜叶和凋落叶)养分元素含量和回收率随海拔的变化特征进行探究,结果表明,不同海拔下,郭岩山丝栗栲叶片养分元素含量和回收率的变化特征存在差异,不同元素间存在一定的相关关系。鲜叶 N 元素含量在 700 和 800 m 海拔处较高;P 元素含量在不同海拔间差异不显著;K 和 Mg 元素含量由于拮抗作用表现出相反的变化特征;Ca 元素含量随海拔升高而逐渐增加。凋落叶中 N 元素含量随海拔的变化趋势与鲜叶相似;P 和 K 元素含量总体对海拔变化响应不显著;Ca 作为重金属元素,在凋落叶中的含量高于鲜叶。在鲜叶养分元素含量相关性分析中,K 与 P 元素含量呈极显著正相关,与 Mg 元素含量呈显著负相关;凋落叶中 K 与 Ca 和 Mg 元素含量均呈显著负相关,Mg 与 N 和 Ca 元素含量呈显著和极显著正相关。丝栗栲鲜叶与凋落叶之间仅 Mg 元素含量呈负相关,其余元素含量均具有正相关关系。N 元素由于在环境中充足,其回收率在 800 和 900 m 海拔处降低;P 元素由于环境中缺乏,表现出较高的回收特征;K 元素回收率在 800 和 900 m 海拔处升高,而 Mg 元素与之相反;Ca 元素不存在养分回收特征。

[参考文献]

- [1] Huang J J, Wang X H, Yan E R. Leaf nutrient concentration, nutrient resorption and litter decomposition in an evergreen broad-leaved forest in eastern China [J]. Forest Ecology and Management, 2007, 239(1): 150-158.
- [2] 熊 玲, 龙翠玲, 廖全兰, 等. 茂兰喀斯特森林木本植物叶的功能性状及其相互关系 [J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(1): 152-159.
- Xiong L, Long C L, Liao Q L, et al. Leaf functional traits and their interrelationships with woody plants in karst forest of Maolan [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2022, 28(1): 152-159.
- [3] 刘雅洁, 王 亮, 樊 伟, 等. 海拔对杉木人工林土壤活性有机碳组分的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(8): 59-69.
- Liu Y J, Wang L, Fan W, et al. Effects of altitude on soil active organic carbon components in *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(8): 59-69.
- [4] 高雅芳. 长白山西坡苔原带尖被藓关键物候期及其与环境要素关系 [D]. 长春: 东北师范大学, 2019.
- Gao Y F. The key phenophases of *Veratrum oxysepalum* and relationship with environmental factors from tundra in the western slope of the Changbai Mountains [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2019.
- [5] 蔡 琴, 丁俊祥, 肖 娟, 等. 青藏高原东缘主要针叶树种叶片 N、P 回收效率 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(8): 2546-2555.

Cai Q,Ding J X,Xiao J,et al. Leaf N and P resorption efficiency of major subalpine coniferous species on the eastern Tibetan Plateau,China [J]. Chinese Journal of Ecology,2020,39(8): 2546-2555.

[6] 白坤栋,莫 凌,刘 铭,等. 广西猫儿山不同海拔常绿和落叶树种的营养再吸收模式 [J]. 生态学报,2015,35(17):5776-5787.

Bai K D,Mo L,Liu M,et al. Nutrient resorption patterns of evergreen and deciduous tree species at different altitudes on Mao'er Mountain,Guangxi [J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(17):5776-5787.

[7] 俞欣妍. 天然丝栗栲生长规律研究 [J]. 中国农学通报,2013,29(31):1-7.

Yu X Y. Study on growth regularity of *Castanopsis fargesii* [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2013,29(31):1-7.

[8] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. 森林植物与森林枯枝落叶层全硅、铁、铝、钙、镁、钾、钠、磷、硫、锰、铜、锌的测定:LY/T 1270—1999 [S]. 北京:中国标准出版社,1999.

Forest Soil Research Laboratory,Institute of Forestry,Chinese Academy of Forestry Sciences. Determination of total Si, Fe, Al,Ca,Mg,K,Na,P,S,Mn,Cu and Zn in forest plants and forest litter layer:LY/T 1270—1999 [S]. Beijing:Standards Press of China,1999.

[9] Lü X T,Qiang C,Wang Q B,et al. Nutrient resorption response to fire and nitrogen addition in a semi-arid grassland [J]. Ecological Engineering,2010,37(3):534-538.

[10] Aerts R,Cornelissen J H C,Logtestijn R S P,et al. Climate change has only a minor impact on nutrient resorption parameters in a high-latitude peatland [J]. Oecologia,2007,151(1): 132-139.

[11] 管东生,罗 琳. 海南热带植物叶片化学元素含量特征 [J]. 林业科学,2003,39(2):28-32.

Guan D S,Luo L. Chemical element concentrations of tropical plant leaves in Hainan Province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003,39(2):28-32.

[12] 李 瑞,胡朝臣,许士麒,等. 大兴安岭泥炭地植物叶片碳氮磷含量及其化学计量学特征 [J]. 植物生态学报,2018,42(12): 1154-1167.

Li R,Hu C C,Xu S Q,et al. Leaf C,N, and P concentrations and their stoichiometry in peatland plants of Da Hinggan Ling,China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2018,42(12):1154-1167.

[13] 郑 媛,郭英荣,王满堂,等. 武夷山不同海拔梯度黄山松叶片养分含量及其再吸收效率 [J]. 安徽农业大学学报,2017,44(3):415-421.

Zheng Y,Guo Y R,Wang M T,et al. Foliar nutrients and their resorption efficiencies of *Pinus hwangshanensis* along an elevation gradient of Wuyi Mountains in Jiangxi [J]. Journal of Anhui Agricultural University,2017,44(3):415-421.

[14] 李诗奇,李 政,王仙宁,等. 植物对氮磷元素吸收利用的生理生态学过程研究进展 [J]. 山东农业科学,2019,51(3):151-157.

Li S Q,Li Z,Wang X N,et al. Advances in research of physiological and ecological process of nitrogen and phosphorus absorption and utilization in plant [J]. Shandong Agricultural Sciences,2019,51(3):151-157.

[15] 杨 蕾,孙 晗,樊艳文,等. 长白山木本植物叶片氮磷含量的海拔梯度格局及影响因子 [J]. 植物生态学报,2017,41(12): 1228-1238.

Yang L,Sun H,Fan Y W,et al. Changes in leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of woody plants along an altitudinal gradient in Changbai Mountain,China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2017,41(12):1228-1238.

[16] 唐海龙,龚 伟,王景燕,等. 氮磷钾不同配比对藤椒产量和品质的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(10):18-26.

Tang H L,Gong W,Wang J Y,et al. Effects of different N,P and K ratios on yield and quality of *Zanthoxylum armatum* [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2019,47(10):18-26.

[17] 薛欣欣,吴小平,王文斌,等. 植物-土壤系统中钾镁营养及其交互作用研究进展 [J]. 土壤,2019,51(1):1-10.

Xue X X,Wu X P,Wang W B,et al. Progress of potassium, magnesium and their interaction in plant-soil system [J]. Soils,2019,51(1):1-10.

[18] 储成才,王 毅,王二涛. 植物氮磷钾养分高效利用研究现状与展望 [J]. 中国科学:生命科学,2021,51(10):1415-1423.

Chu C C,Wang Y,Wang E T. Improving the utilization efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium: current situation and future perspectives [J]. Scientia Sinica (Vitae), 2021,51(10):1415-1423.

[19] 任城帅,李 慧,翁小航,等. 外源钙对水曲柳生长、光合特性及水分利用效率的影响 [J]. 沈阳农业大学学报,2020,51(6):663-669.

Ren C S,Li H,Weng X H,et al. Effects of exogenous calcium on the growth, photosynthetic characteristics and water use efficiency of *Fraxinus mandshurica* [J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2020,51(6):663-669.

[20] 刘俊峰,陈仁升,卿文武,等. 基于 TRMM 降水数据的山区降水垂直分布特征 [J]. 水科学进展,2011,22(4):447-454.

Liu J F,Chen R S,Qing W W,et al. Study on the vertical distribution of precipitation in mountainous regions using TRMM data [J]. Advances in Water Science,2011,22(4): 447-454.

[21] 董艳红,王火焰,周健民,等. 不同土壤钾素淋溶特性的初步研究 [J]. 土壤,2014,46(2):225-231.

Dong Y H,Wang H Y,Zhou J M,et al. Preliminary study on potassium leaching characteristics of different soils [J]. Soils, 2014,46(2):225-231.

[22] Brant A N,Chen H Y H. Patterns and mechanisms of nutrient resorption in plants [J]. Critical Reviews in Plant Sciences,2015,34(5):471-486.

new disease of cotton in Brazil [J]. Plant Disease, 1998, 82 (3):333-336.

[20] 程晓兰,程智慧,邹 燕,等. 大蒜叶枯病抗性鉴定方法的筛选 [J]. 华中农业大学学报, 2010, 29(1):26-30.

Cheng X L, Cheng Z H, Zou Y, et al. Screen of evaluation methodology of garlic resistance to tip blight [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2010, 29(1):26-30.

[21] 魏景超. 真菌鉴定手册 [M]. 上海:上海科学技术出版社, 1979.

Wei J C. Fungal identification manual [M]. Shanghai:Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1979.

[22] Stromeng G M, Brurberg M B, Vike E, et al. Daylily leaf streak found on *Hemerocallis* spp. in Norway [J]. Phytopathology, 2014, 104(11):115.

[23] Xu X, Yang X L, Zhang L, et al. First report of leaf blight caused by *Limonomyces roseipellis* on maize (*Zea mays* L.) in China [J]. Plant Disease, 2021, 105(9):2730.

[24] Zhang W, Nan Z B, Liu G D. First report of *Limonomyces roseipellis* causing pink patch on bermudagrass in South China [J]. Plant Disease, 2013, 97(4):561.

[25] Sumida C H, Canteri M G, Peitl D C, et al. Chemical and biological control of *Sclerotinia* stem rot in the soybean crop [J]. Ciencia Rural, 2015, 45(5):760-766.

[26] Rogers P M, Stevenson W R. Aggressiveness and fungicide sensitivity of *Alternaria dauci* from cultivated carrot [J]. Plant Disease, 2010, 94(4): 405-412.

[27] Large E C, Beer W J, Patterson J B. Field trials of copper fungicides for the control of potato blight Ⅲ. low-copper fungicides [J]. Annals of Applied Biology, 1946, 33(1):54-63.

(上接第 83 页)

[23] 黄承标,石化玉,覃文盛,等. 三种不同植被恢复模式地上生物量及其营养元素含量研究 [J]. 森林工程, 2004, 20(1):9-10, 13.

Huang C B, Shi H Y, Qin W S, et al. Upground biomass and nutrition elements contents of three different vegetation storatation pattern in karst stone areas [J]. Forest Engineering, 2004, 20(1):9-10, 13.

[24] 刘佳庆,王晓雨,郭 焱,等. 长白山林线主要木本植物叶片养分的季节动态及回收效率 [J]. 生态学报, 2015, 35(1):165-171.

Liu J Q, Wang X Y, Guo Y, et al. Seasonal dynamics and resorption efficiencies of foliar nutrients in three dominant woody plants that grow at the treeline on Changbai Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1):165-171.

[25] Xie Y J, Cao Y S, Xie Y H. Global-scale latitudinal patterns of twelve mineral elements in leaf litter [J]. Catena, 2022, 208: 1-7.

[26] 苏 波,韩兴国,黄建辉,等. 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 X G, Huang J H, et al. The nutrient use efficiency (NUE) of plants and its implications on the strategy of plant adaptation to nutrient stressed environments [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(2):335-343.

[27] Gusewell S. Nutrient resorption of wetland graminoids is related to the type of nutrient limitation [J]. Functional Ecology, 2005, 19(2):344-354.

[28] 张美霞. 中国北方木本植物叶中 10 种养分元素重吸收研究 [D]. 北京:中国农业大学, 2018.

Zhang M X. Resorption patterns of 10 nutrient elements in leaves of woody plants in Northern China [D]. Beijing:China Agricultural University, 2018.

[29] 孙书存,陈灵芝. 东灵山地区辽东栎叶养分的季节动态与回收效率 [J]. 植物生态学报, 2001, 25(1):76-82.

Sun S C, Chen L Z. Leaf nutrient dynamics and resorption efficiency of *Quercus liaotungensis* in the Dongling Mountain region [J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2001, 25(1):76-82.

[30] Liu C C, Liu Y G, Guo K, et al. Concentrations and resorption patterns of 13 nutrients in different plant functional types in the karst region of south-western China [J]. Annals of Botany, 2014, 113(5):873-885.

[31] Vergutz L, Manzoni S, Porporato A, et al. Global resorption efficiencies and concentrations of carbon and nutrients in leaves of terrestrial plants [J]. Ecological Monographs, 2012, 82 (2):205-220.

[32] 孟庆权,葛露露,王 俊,等. 福建三明格氏栲和杉木叶片养分季节动态及再吸收特征 [J]. 四川农业大学学报, 2019, 37 (3):366-373.

Meng Q Q, Ge L L, Wang J, et al. Seasonal dynamics on nutrient concentrations and resorptions in the leaves of *Castanopsis kawakamii* and *Cunninghamia lanceolata*, in Sanming, Fujian Province [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2019, 37(3):366-373.

[33] Du B M, Ji H W, Peng C, et al. Altitudinal patterns of leaf stoichiometry and nutrient resorption in *Quercus variabilis* in the Baotianman Mountains, China [J]. Plant and Soil, 2017, 413(1/2):193-202.