

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

郑媛^{1,2}, 郭英荣³, 王满堂⁴, 李曼^{1,2}, 范瑞瑞^{1,2},
孙俊^{1,2}, 杨福春^{1,2}, 钟全林^{1,2,5}, 程栋梁^{1,2,5*}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007;
3. 江西省武夷山自然保护区管理局, 铅山 334500; 4. 枣庄学院城市与建筑工程学院, 枣庄 277106;
5. 福建省生理生态重点实验室, 福州 350007)

摘要: 氮、磷在植物的生长和代谢过程中具有关键作用, 是陆地生态系统生产力的主要限制因素。植物克服氮、磷元素对生长限制的一个重要策略就是从凋落前的凋落叶中进行养分再吸收。选取武夷山自然保护区不同海拔黄山松的成熟叶与凋落叶, 测定其 C、N、P 含量, 分析 N/P 及 N、P 养分再吸收效率随海拔梯度的变化特征。结果显示: (1) 黄山松成熟叶全氮、全磷含量变化范围分别是 14.94~21.45 mg·g⁻¹ 与 0.86~1.51 mg·g⁻¹, 凋落叶全氮、全磷含量变化范围分别是 4.73~7.17 mg·g⁻¹ 与 0.16~0.30 mg·g⁻¹; (2) 成熟叶片 N/P 随海拔升高而显著降低, 凋落叶片 N/P 则随海拔升高呈指数递增趋势; (3) 成熟叶 N/P 与土壤 N/P 显著正相关, 而凋落叶 N/P 则随土壤 N/P 的升高指数降低; (4) 叶片 N、P 再吸收效率随海拔升高呈先降低后升高的趋势, 且各海拔叶片 P 再吸收效率显著大于 N 再吸收效率。表明黄山松具有较高的 N、P 元素的再吸收效率, 而且相对于 N、P 元素是该区域黄山松养分循环的关键因素。

关键词: 叶片氮磷比; 再吸收效率; 海拔梯度; 黄山松; 武夷山

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)03-0415-07

Foliar nutrients and their resorption efficiencies of *Pinus hwangshanensis* along an elevation gradient of Wuyi Mountains in Jiangxi

ZHENG Yuan^{1,2}, GUO Yingrong³, WANG Mantang⁴, LI Man^{1,2}, FAN Ruirui^{1,2}, SUN Jun^{1,2},
YANG Fuchun^{1,2}, ZHONG Quanlin^{1,2,5}, CHENG Dongliang^{1,2,5}

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007;

2. State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007;

3. Administrative Bureau of Jiangxi Wuyishan National Nature Reserve, Yanshan 334500;

4. School of City and Civil Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang 277106;

5. Fujian Provincial Key Laboratory of Plant Ecophysiology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

Abstract: Nutrient resorption, one of the important mechanisms for nutrient conservation in plant species, plays an important role in litter decomposition and ecosystem nutrient cycling. To investigate the nutrient resorption characteristics of *Pinus hwangshanensis* W.Y.Hsia along different mountain elevations, the N and P contents in foliage and fresh litter of *P. hwangshanensis* growing in five elevational sites of Wuyi Mountains in Jiangxi Province were determined. The results showed as follows: (1) the foliage N content in *P. Hwangshanensis* ranged from 14.94 to 21.45 mg·g⁻¹ and the foliage P content ranged from 0.86 mg·g⁻¹ to 1.51 mg·g⁻¹; (2) in the fresh litter, N and P contents ranged from 4.73 to 7.17 mg·g⁻¹ and from 0.16 to 0.30 mg·g⁻¹, respectively; (3) the foliage N/P ratio was negatively correlated with elevations ($P < 0.05$). The fresh litter N/P ratio showed an exponential relation to elevations ($P < 0.01$). The foliage N/P was positively correlated with the soil N/P ($P < 0.05$), whereas the fresh litter N/P was exponential declined with soil N/P ($P < 0.01$). The trend of N resorption efficiency and P resorption

收稿日期: 2016-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(31370589, 31170374)、福建省青年拔尖人才支持计划和山东省自然科学基金(ZR2013CL027)共同资助。

作者简介: 郑媛, 硕士研究生。E-mail: yuanzhengfj@163.com

* 通信作者: 程栋梁, 教授, 博士生导师。E-mail: chengdl02@aliyun.com

efficiency was high-low-high along the elevation gradients. P resorption efficiency was uniformly higher than N resorption efficiency, suggesting that P may play an important role in litter decomposition and nutrient cycling at different elevations of Wuyi Mountains.

Key words: N/P ratio; resorption efficiencies; elevation gradients; *Pinushwangshanensis*; Wuyi Mountains

氮、磷是植物生长不可或缺的两大矿物质营养元素,决定着植物的生理生态特征和功能,对调节植物和凋落物分解速率乃至生态系统的平衡至关重要。因此,氮、磷是陆地生态系统生产力的主要限制因素^[1]。植物克服氮、磷元素限制的一个重要策略就是从凋落前的凋落叶中进行养分再吸收^[2]。养分再吸收是指养分从凋落叶片中转移并被运输到植物其他组织的过程^[3-4]。养分从衰老的叶片或者其他树木组织中的再迁移、再吸收或者再分配,使得其在植物体内的存留时间延长,为树木提供新的生物量生产所需的养分^[5-6]。养分再吸收不仅是植物对养分贫瘠环境的一种适应机制,也是植物保存养分、提高吸收能力和生产力的重要策略之一^[7-9]。植物养分再吸收的能力通过采用树木叶片营养元素再吸收效率进行表示,即指凋落叶在凋落过程中迁移出去的养分含量占成熟叶片养分含量的百分比,反映了植物对养分留存、利用和适应贫瘠环境的能力^[10]。全球树种的氮再吸收效率平均值为46.9%,我国东南地区树种的平均值为49.1%;全球树种的磷再吸收效率平均值为53.5%,我国东南地区树种的平均值为51.1%^[11-12]。目前,养分再吸收方面的研究主要集中在养分再吸收与土壤肥力^[13-14]、植物生活型^[3,15]、群落演替^[16-17]和叶片寿命长短^[18-19]等关系方面。

一般认为土壤贫瘠生境中的植物比土壤肥沃生境中的植物具有更高的养分再吸收效率^[20-22]。然而,也有研究表明土壤贫瘠生境中植物和土壤肥沃生境中的植物在养分再吸收率方面没有明显差别^[3,23]。因此,土壤养分供给性大小是否会影响植物氮和磷再吸收效率还存在许多争议。相关研究表明,热带干旱生境中的落叶树种比常绿树种有较高的氮、磷再吸收效率^[22],亚热带常绿阔叶林中的落叶树种比常绿树种有较高的磷再吸收效率,但氮再吸收效率在两者之间无显著差异^[24-26],温带森林中的常绿树种的氮再吸收显著低于落叶树种而磷再吸收效率在两者之间无显著差异^[3,27],说明叶片养分再吸收效率随生境的不同而呈现明显的多样性。海拔、气候与土壤条件等会影响土壤养分的有效性,进而影响植物叶片的养分再吸收效率。

黄山松(*Pinushwangshanensis* W.Y. Hsia)又称台湾松,为中国特有的常绿乔木树种。喜光、耐干

旱、耐瘠薄、抗风能力强、材质良好且病虫害危害少,生长持续时间长,分布较广,主要分布于浙江、安徽、江西、福建和台湾等地的山区,是亚热带中部中山地区的主要建群种。为此,以江西省武夷山自然保护区不同海拔黄山松叶片为研究对象,通过测定其成熟叶片和凋落叶片的全碳、全氮和全磷含量,分析不同海拔黄山松叶片氮、磷养分再吸收率的差异,探讨海拔(气候)、土壤等因素对叶片氮、磷养分再吸收的影响,旨在揭示海拔(气候)、土壤等因素对叶片氮、磷养分再吸收的影响机制,为应对全球变化背景下山地生态系统管理及开展人工林经营过程中的养分管理技术研究等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

武夷山位于福建北部的南平武夷山市,东连浦城县,南接建阳市,西临光泽县,北与江西省铅山县毗邻。本实验地选择在江西省武夷山国家级自然保护区内,其位于江西省东部、武夷山脉北段西北坡,地理坐标为27°48'11"~28°00'35"N,117°39'30"~117°55'47"E,平均海拔1200 m,年均气温14.2℃,年均降水量2583 mm,年均蒸发量778 mm,年平均日照时数约960 h。本区土壤具有典型的亚热带中山土壤的特点,可分为山地黄红壤(400~600 m)、山地黄壤(600~1300 m)、暗黄棕壤(1300~1900 m)、山地草甸土(1900 m以上)。

1.2 样地选取

2014年10月在武夷山自然保护区海拔1200 m、1400 m、1600 m、1800 m和2000 m黄山松典型分布区中分别选取3个20 m×20 m的样地,样地的选取遵循随机性和独立性,所选实验样地距离林分边缘均大于50 m,且林木生长状况较好。本次共设置了15个样地(表1),选取的样地郁闭度均大于50%,平均胸径为14.25~23.99 cm之间,平均树高为4.76~16.19 m之间,土壤pH为3.90~4.36。

1.3 样品采集

1.3.1 叶片样品 2014年11月中旬,在5个不同海拔梯度黄山松的典型样地中,东、西、南、北4个方位分别选取长势良好的黄山松,采集当年成熟叶,利用高枝剪剪下选中的枝条,选择没有病虫害

害且向阳一侧的健康当年生成熟叶(绿色)进行采集, 约 100 g, 带回实验室备用。

2014 年 11 月底到 2014 年 12 月底, 每周采集 2 次落叶。取样时, 用手轻轻晃动黄山松枝条, 叶片脱落, 即可判断此时叶片已经衰老, 收集凋落叶

100 g, 带回实验室备用。

将采集不同海拔黄山松当年生成熟叶和凋落叶置于 105℃烘箱中杀青 30 min, 然后在 65℃烘箱中烘干 48 h 至恒重, 用植物粉碎机将叶片粉碎成粉末过 100 目筛备用。

表 1 不同海拔梯度黄山松样地基本概况

Table 1 The basic characteristics of *Pinushwangshanensis* stand along elevation gradient

海拔梯度/m Elevation gradient	黄山松林分特征 Stand characteristics of <i>Pinushwangshanensis</i>			
	郁闭度/° Forest canopy closure	密度/hm ² Density of tree	平均胸径/cm Average DBH	平均树高 Average height/m
1 200	86.67±3.33 ^a	717.25±65.08 ^c	23.99±0.79 ^b	16.19±0.46 ^a
1 400	86.33±3.18 ^a	1991.12±256.73 ^a	14.25±0.36 ^{ab}	13.29±0.23 ^b
1 600	90.33±0.33 ^a	1533.36±370.90 ^b	14.53±0.40 ^a	10.49±0.16 ^c
1 800	60.00±5.77 ^b	417.29±130.98 ^c	14.84±0.69 ^a	6.22±0.20 ^d
2 000	49.67±0.33 ^c	525.00±160.73 ^c	13.17±0.66 ^a	4.76±0.14 ^e

土壤概况 Basic characteristics of soil			
pH	全碳/mg·g ⁻¹ Total C	全氮/mg·g ⁻¹ Total N	全磷/mg·g ⁻¹ Total P
3.90±0.09 ^c	98.75±1.60 ^a	5.84±0.07 ^a	0.19±0.01 ^c
3.94±0.04 ^c	77.02±5.27 ^b	4.20±0.19 ^c	0.15±0.01 ^c
4.13±0.09 ^b	97.42±6.78 ^a	5.74±0.38 ^a	0.27±0.03 ^b
4.20±0.06 ^{ab}	66.66±1.22 ^b	5.03±0.09 ^b	0.27±0.01 ^b
4.36±0.02 ^a	76.76±2.96 ^b	5.76±0.17 ^a	0.43±0.02 ^a

注: 小写字母代表不同海拔之间的显著性差异, 其中 $P < 0.05$ 。下同。

Note: Different letters indicate significant differences of different altitudes at $P < 0.05$ level. The same below.

1.3.2 土壤样品 在各样地内, 分别按照 S 型的方法取 10 个点 0~10 cm 土层的土壤样品各 500 g, 按照四分法将混合的土壤进行分样, 将多余的土壤弃去, 取土壤混合样品 200 g 带回实验室备用。将采集不同海拔样地的土壤样品风干, 研磨过 100 目筛备用。

1.4 样品测定

碳、氮的测定: 元素分析仪 (Elemental Analyzer Vario EL III) 测定

全磷的测定: 钼锑抗比色法处理, 连续流动分析仪 (荷兰 SKALAR) 测定

土壤 pH 值的测定: 电极法 (便携式 pH 计, 奥豪斯仪器有限公司) 测定

1.5 计算方法

氮和磷再吸收效率 (resorption efficiencies, RE) 是从凋落叶片中转移出氮、磷的百分比^[15]; 计算公式如下:

$$RE = (A_1 - A_2) / A_1 \times 100\%$$

其中, A_1 、 A_2 分别指成熟叶、凋落叶中的元素含量。

1.6 数据分析

不同海拔黄山松成熟叶和凋落叶养分含量、

C/N、N/P、C/P 及养分再吸收率差异等多组间比较采用单因素方差分析 (ANOVA), 用最小显著差异法 (LSD) 进行显著性检验, 全部数据采用 SPSS 20.0 统计分析软件进行分析, 并采用 Origin 9.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同海拔黄山松成熟叶和凋落叶 C、N、P 含量变化

不同海拔黄山松成熟叶的 C、N 和 P 含量具有显著差异: 成熟叶全碳含量在 504.39~514.18 mg·g⁻¹ 之间, 且随海拔升高先减少后增加 (表 2); 成熟叶全氮与全磷含量均随海拔升高先减少再增加再减少, 趋势相同。

不同海拔黄山松凋落叶 C、N 和 P 含量也具有显著差异: 全碳含量随海拔升高平稳增加 (表 2); 全氮含量与全磷含量均随海拔升高先增加再减少, 且最小值均在 1 200 m, 最大值均在 1 800 m (表 2)。

除 1 200 m 以外, 黄山松凋落叶的全碳含量均显著大于成熟叶 ($P < 0.05$), 其全氮、全磷含量极显著小于成熟叶 ($P < 0.01$) (表 2), 以海拔 1 800 m 处的黄山松成熟叶、凋落叶全氮、全磷含量为最大,

1 600 m 处的黄山松成熟叶片全氮、全磷含量为最小(表 2)。

2.2 不同海拔黄山松的成熟叶和凋落叶叶片元素化学计量特征

黄山松成熟叶的 C/N 在 23.46~33.81 mg·g⁻¹ 之间, 它随海拔升高呈先升高再降低再升高的态势, 最小值在 1 800 m, 最大值在 1 600 m; 其 N/P 在 14.05~17.86 mg·g⁻¹ 之间, 它随海拔升高先升高再降低, 最小值在 2 000 m, 最大值在 1 400 m; 其 C/P 在 336.63~585.90 mg·g⁻¹ 之间, 它随海拔升高先升高再降低再升高, 最小值在 1 800 m, 最大值在 1 600 m (表 3)。

黄山松凋落叶的 C/N 在 72.54~108.58 mg·g⁻¹ 之间, 它随海拔升高先降低再升高, 最小值在

1 800 m, 最大值在 2 000 m; 其 N/P 在 21.74~30.48 mg·g⁻¹ 之间, 它随海拔升高先升高再降低再升高, 最小值在 1 200 m, 最大值在 2 000 m; 其 C/P 在 1 721.32~3 302.70 mg·g⁻¹ 之间, 它随海拔升高先降低再升高, 最小值在 1 800 m, 最大值在 2 000 m。

黄山松凋落叶的 C/N 极显著大于成熟叶 C/N ($P<0.01$), 其 N/P 显著大于成熟叶 N/P ($P<0.05$), C/P 极显著大于成熟叶 C/P ($P<0.01$)。海拔 1 800 m 处的黄山松成熟叶的 C/N、N/P 和 C/P 均为最小值。

黄山松成熟叶片的 N/P 与海拔梯度有显著负相关 ($R^2=0.71$, $P<0.05$), 黄山松凋落叶片 N/P 随海拔梯度升高呈指数递增 ($R^2=0.76$, $P<0.01$) (图 1)。

表 2 不同海拔梯度黄山松成熟叶和凋落叶叶片养分含量

Table 2 The nutrient contents of foliage and fresh litter of *Pinushwangshanensis* along elevation gradient

类型 Type	海拔梯度/m Elevation gradient	全碳/mg·g ⁻¹ Total C	全氮/mg·g ⁻¹ Total N	全磷/mg·g ⁻¹ Total P
成熟叶 Foliage	1 200	514.18±0.10 ^a	18.92±0.12 ^b	1.06±0.011 ^c
	1 400	513.66±0.17 ^a	17.46±0.23 ^c	0.98±0.002 ^d
	1 600	504.39±0.25 ^c	14.94±0.43 ^d	0.86±0.004 ^e
	1 800	508.62±0.72 ^b	21.44±0.22 ^a	1.51±0.005 ^a
	2 000	509.88±0.95 ^b	18.43±0.09 ^{bc}	1.31±0.004 ^b
凋落叶 Fresh litter	1 200	513.19±2.01 ^c	4.73±0.11 ^d	0.22±0.001 ^c
	1 400	523.69±1.83 ^{ab}	5.48±0.11 ^c	0.24±0.003 ^b
	1 600	523.32±1.26 ^{ab}	6.17±0.02 ^b	0.25±0.001 ^b
	1 800	520.03±1.21 ^b	7.17±0.06 ^a	0.30±0.001 ^a
	2 000	529.26±0.62 ^a	4.89±0.20 ^{cd}	0.16±0.001 ^d

表 3 不同海拔黄山松成熟叶和凋落叶 C/N、N/P 和 C/P

Table 3 C, N, P stoichiometry of foliage and fresh litter of *Pinushwangshanensis* along elevation gradient

类型 Type	海拔梯度/m Elevation gradient	C/N	N/P	C/P
成熟叶 Foliage	1 200	27.35±0.23 ^b	17.56±0.39 ^a	487.47±5.16 ^c
	1 400	29.42±0.37 ^b	17.86±0.21 ^a	525.48±0.80 ^b
	1 600	33.81±0.97 ^a	17.36±0.55 ^a	585.90±2.21 ^a
	1 800	23.46±0.33 ^c	14.19±0.11 ^b	336.63±0.66 ^e
	2 000	27.66±0.09 ^b	14.05±0.06 ^b	388.745±1.49 ^d
凋落叶 Fresh litter	1 200	108.58±2.98 ^a	21.74±0.47 ^c	2 357.66±16.06 ^b
	1 400	95.61±1.52 ^b	22.65±0.74 ^{bc}	2 163.43±36.09 ^c
	1 600	84.83±0.15 ^{bc}	25.19±0.17 ^b	2 136.46±11.82 ^c
	1 800	72.54±0.77 ^c	23.73±0.14 ^{bc}	1 721.32±9.44 ^d
	2 000	108.67±4.10 ^a	30.48±1.14 ^a	3 302.70±16.02 ^a

2.3 土壤 N、P 与黄山松的成熟叶和凋落叶的 N/P 的关系

土壤 P 含量与黄山松凋落叶 N/P 有极显著正相关关系 ($R^2=0.92$, $P<0.01$), 成熟叶的 N/P 与土壤磷含量相关不显著 ($P>0.05$) (图 2)。

黄山松成熟叶与凋落叶的 N/P 随土壤 N/P 升高表现出显著不同的变化趋势, 成熟叶 N/P 与土壤 N/P 极显著正相关 ($R^2=0.70$, $P<0.05$), 而凋落叶的 N/P 随土壤 N/P 升高呈指数递减 ($R^2=0.81$, $P<0.01$) (图 3)。

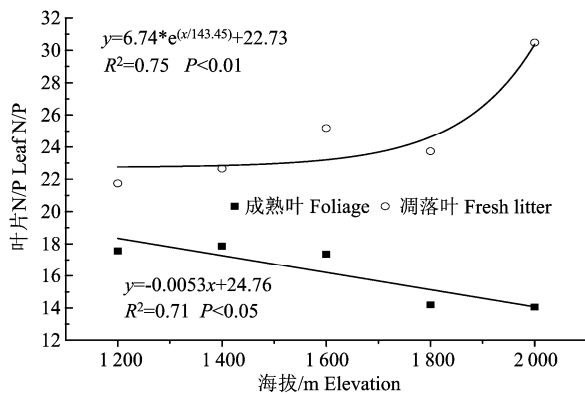


图 1 不同海拔梯度黄山松叶片 N/P 变化趋势

Figure 1 The tendency of leaf N/P along elevation gradient

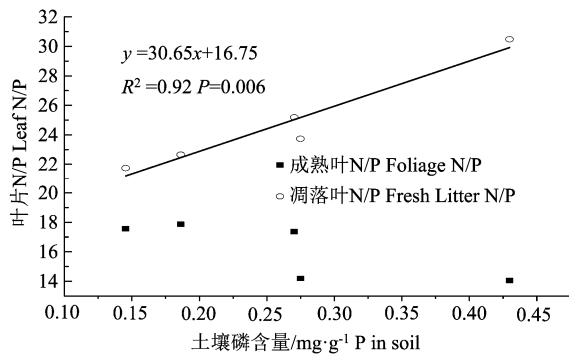


图 2 土壤 P 与黄山松成熟叶和凋落叶 N/P 的关系

Figure 2 Relationships between soil P and leaf N/P

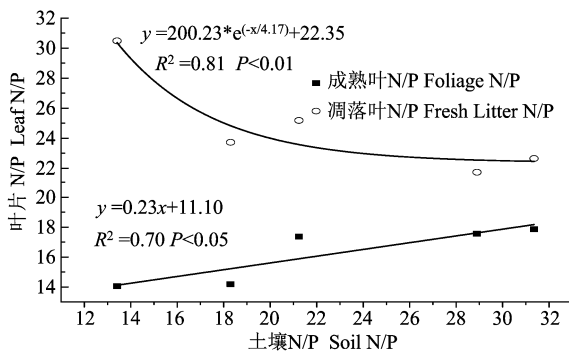


图 3 土壤 N/P 与黄山松成熟叶和凋落叶 N/P 的关系

Figure 3 Relationships between soil N/P and leaf N/P

2.4 不同海拔黄山松针叶养分再吸收效率

不同海拔黄山松叶片养分再吸收效率有明显差异(图 4)。叶片的氮再吸收率在 58.65%~74.99% 之间,它随海拔升高先降低再升高;其磷再吸收率在 71.54%~87.78% 之间,它随海拔升高先降低后升高。叶片的磷再吸收效率显著大于氮再吸收效率 ($P < 0.01$)。

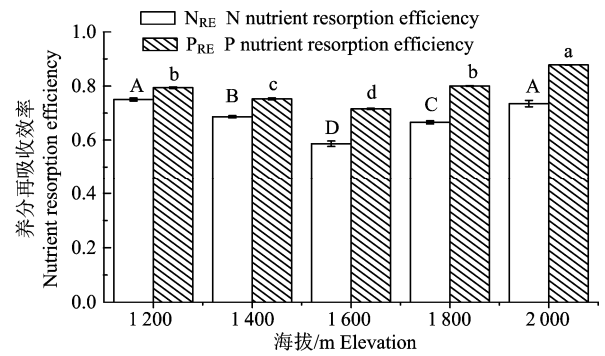


图 4 不同海拔梯度黄山松叶片氮磷养分再吸收率

Figure 4 Nutrient resorption efficiency of *Pinushwangshanensis* along elevation gradient

3 讨论

3.1 不同海拔黄山松的成熟叶和凋落叶养分含量

植物生物量中的氮、磷含量或者氮磷比均能作为判定植物营养元素限制的指标,其与植物的生长速率,群落组成关系密切^[28-30]。黄山松的成熟叶片平均氮含量为 $18.24 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均磷含量为 $1.14 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 均低于中国陆地植被叶片平均氮含量 $18.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均磷含量为 $1.21 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[28], 也低于全球水平(氮、磷含量分别为 $18.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $1.42 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。黄山松的成熟叶的平均氮磷比为 16.21, 接近全国平均氮磷比 16.3, 但高于全球水平(11.8)^[31-32]。

氮、磷作为植物生长的限制因素,一般认为,当成熟叶的氮磷比小于 14 时表示植物生长受氮元素限制,氮磷比在 14~16 之间则表示同时受氮、磷元素制约,氮磷比大于 16 则表示植物生长受磷元素限制^[33]。低海拔(海拔 $\leq 1600 \text{ m}$)的黄山松的成熟叶片的氮磷比均大于 17, 高海拔(海拔 $\geq 1800 \text{ m}$)黄山松的成熟叶片的氮磷比分别为 14.19 和 14.05, 表明低海拔区间生长的黄山松主要受磷元素限制,在高海拔区间生长的黄山松可能受氮、磷元素共同限制。有研究指出,当年均温 $< 12^\circ\text{C}$ 时,植物生长将会由受磷限制转换为受氮元素限制^[32], 因此,黄山松生长限制因子随海拔梯度的变异,可能是随海拔升高温度降低导致的。前人研究表明,就全球范围而言,北方和温带的森林生产量普遍受到 N 限制,而亚热带常绿林和热带雨林则主要受到 P 限制^[29-33], 这与本研究结论一致。

Han 等研究指出,叶片氮、磷含量随纬度的增加(年均温降低)而增加,但其氮磷比没有显著变化^[28], 本研究则表明,黄山松的成熟叶的氮含量并未随海拔升高(年均温降低)而增加,但高海拔处的叶片磷含量显著大于低海拔处的叶片磷含量(表

2), 成熟叶 N/P 随海拔升高(年均温降低)而降低(图 1), 这与 Reich 和 Oleksyn 发现叶片氮磷比随纬度的增加(年均温降低)而升高^[29]的研究结果基本一致。

3.2 不同海拔黄山松叶片的 N、P 再吸收规律

植物叶片养分含量可反映土壤基质和肥力情况。本研究表明, 土壤 N/P 与成熟叶 N/P 呈显著正相关(如图 2)。凋落物将养分归还给土壤, 为植物生长提供养分^[34], 土壤 P 含量与黄山松凋落叶 N/P 存在极显著正相关(如图 3), 表明土壤养分对凋落叶养分含量有重要影响。由表 1 可知, 土壤 N/P 均大于 13, 明显高于我国温带山地土壤 N/P 的平均值(4.5), 这表明土壤 P 限制较为突出^[18], 且黄山松为针叶树种, 养分转移策略相对保守^[35]。

养分再吸收反映了植物对贫瘠环境适应性, 且影响养分再吸收效率因素有很多, 物种间差异和环境胁迫都会对植物养分再吸收效率产生差异^[36-38]。

Killingbeck 指出, 用凋落叶中元素含量表示养分再吸收程度, 凋落叶的 N、P 含量越低, 表示其 N、P 养分再吸收程度越高, 并指出 N、P 含量分别大于 $10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的植物有较低的再吸收效率; 凋落叶中的 N 含量小于 $7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 表示 N 完全再吸收, 其 P 含量小于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 表示 P 完全吸收^[10]。海拔 1 200 m、1 400 m、1 600 m 和 2 000 m 处的凋落叶片的 N 含量均小于 $7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 表示 N 完全吸收, 海拔 1 200 m、1 400 m、1 600 m、1 800 m 和 2 000 m 处的凋落叶片的 P 含量均小于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 表示 P 完全吸收。同时, Killingbeck 还指出, 植物凋落物中 N、P 含量越低, 植物对 N、P 养分的回收利用程度越高, 表明土壤环境中缺少 N、P 营养元素或者外界环境对植物吸收 N、P 养分的限制作用较强^[10]。本研究的黄山松凋落叶中的 N、P 再吸收程度均大于 50%, 表明叶片 P 完全吸收, 土壤环境中缺少 P 元素, 这与样地土壤养分 P 限制研究结果是一致的。

武夷山 5 个海拔梯度的典型样地中的黄山松的成熟叶的 N 再吸收率达 58% 以上, P 再吸收率达 71% 以上, 均高于已报道的全球树种平均值 46.9% 和 53.5%^[11]。黄山松成熟针叶氮和磷均低于全国、全球水平, 进而氮和磷再吸收效率大于 50%, 依据 Killingbeck 的理论, 氮和磷属于完全吸收^[10]。武夷山 5 个海拔梯度黄山松针叶 P 再吸收率显著大于 N 再吸收率, 反映出 P 比 N 更优先再吸收, 这与青藏高原草甸和热带雨林生态系统中限制性营养元素在贫瘠土壤中优先再吸收的结果一致^[39-40]。

全球气候变化的背景下, 随着温度的升高, N 再吸收率下降而 P 的再吸收率上升^[11], 但是由于温度、降水等气候因素会影响土壤基质和土壤养分有效性, 尤其是武夷山地处亚热带地区, 土壤相对缺 P。随海拔的升高, 温度、降水变化, 养分再吸收率与土壤养分含量未见相关性(未发表)。在低海拔黄山松受到 P 限制, 高海拔黄山松受 N、P 共同限制的情况下, 更有可能提高 N、P 的再吸收效率, 以确保黄山松在贫瘠生境中取得竞争优势。

参考文献:

- [1] OLDE VENTERINK H, WASSEN M J, VERKROOST A W M, et al. Species richness-productivity patterns differ between N⁻, P⁻, and K⁻ limited wetlands[J]. Ecology, 2003, 84(8): 2191-2199.
- [2] ELSER J J, URABE J. The stoichiometry of consumer-driven nutrient recycling: Theory, observations, and consequences[J]. Ecology, 1999, 80(3): 735-751.
- [3] AERTS R. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns?[J]. J Ecol, 1996, 84(4): 597-608.
- [4] KILLINGBECK K T. The terminological jungle revisited: making a case for use of the term resorption[J]. Oikos, 1986, 46(2): 263-264.
- [5] SOLLINS P, GRIER C C, MCCORISON F M, et al. The internal element cycles of an old-growth Douglas-fir ecosystem in western Oregon[J]. Ecol Monogr, 1980, 50(3): 261-285.
- [6] MEIER C E, GRIER C C, COLE D W. Below-and aboveground N and P use by *Abies amabilis* stands[J]. Ecology, 1985, 66(6): 1928-1942.
- [7] AERTS R. Nutrient use efficiency in evergreen and deciduous species from heathlands[J]. Oecologia, 1990, 84(3): 391-397.
- [8] MAY J D, KILLINGBECK K T. Effects of preventing nutrient resorption on plant fitness and foliar nutrient dynamics[J]. Ecology, 1992, 73(5): 1868-1878.
- [9] SANTA REGINA I, LEONARDI S, RAPP M. Foliar nutrient dynamics and nutrient-use efficiency in *Castanea sativa* coppice stands of southern Europe[J]. Forestry, 2001, 74(1): 1-10.
- [10] KILLINGBECK K T. Nutrients in senesced leaves: keys to the search for potential resorption and resorption proficiency[J]. Ecology, 1996, 77(6): 1716-1727.
- [11] YUAN Z Y, CHEN H Y H. Global-scale patterns of nutrient resorption associated with latitude, temperature and precipitation[J]. Global Ecol Biogeogr, 2009, 18(1): 11-18.
- [12] TANG L, HAN W, CHEN Y, et al. Resorption proficiency and efficiency of leaf nutrients in woody plants in eastern China[J]. J Plant Ecol-UK, 2013, 6(5): 408-417.
- [13] YUAN Z Y, LI L H, HAN X G, et al. Soil characteristics and nitrogen resorption in *Stipa krylovii* native to northern China[J]. Plant Soil, 2005, 273(1): 257-268.
- [14] MILLA R, PALACIO-BLASCO S, MAESTROMARTÍNEZ M, et al. Phosphorus accretion in old leaves of a

- Mediterranean shrub growing at a phosphorus-rich site[J]. *Plant Soil*, 2006, 280(1/2): 369-372.
- [15] YUAN Z Y, LI L H, HAN X G, et al. Nitrogen resorption from senescing leaves in 28 plant species in a semi-arid region of northern China[J]. *J Arid Environ*, 2005, 63(1): 191-202.
- [16] KAZAKOU E, GARNIER E, NAVAS M L, et al. Components of nutrient residence time and the leaf economics spectrum in species from Mediterranean old-fields differing in successional status[J]. *Funct Ecol*, 2007, 21(2): 235-245.
- [17] YAN E R, WANG X H, HUANG J J. Shifts in plant nutrient use strategies under secondary forest succession[J]. *Plant Soil*, 2006, 289(1/2): 187-197.
- [18] WRIGHT I J, WESTOBY M. Nutrient concentration, resorption and lifespan: leaf traits of Australian sclerophyll species[J]. *Funct Ecol*, 2003, 17(1): 10-19.
- [19] ECKSTEIN R L, KARLSSON P S, WEIH M. Leaf life span and nutrient resorption as determinants of plant nutrient conservation in temperate-arctic regions[J]. *New Phytol*, 1999, 143(1): 177-189.
- [20] HOBBI E S. Effects of plant species on nutrient cycling[J]. *Trends Ecol Evol*, 1992, 7(10): 336-339.
- [21] DEMARS B G, BOERNER R E J. Foliar nutrient dynamics and resorption in naturalized *Lonicera maackii* (Caprifoliaceae) populations in Ohio, USA[J]. *Am J Bot*, 1997, 84(1): 112-117.
- [22] LAL C B, ANNAPURNA C, RAGHUBANSHI A S, et al. Effect of leaf habit and soil type on nutrient resorption and conservation in woody species of a dry tropical environment[J]. *Can J Bot*, 2001, 79(9): 1066-1075.
- [23] CHEN Y, HAN W, TANG L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus concentrations of woody plants differ in responses to climate, soil and plant growth form[J]. *Ecography*, 2013, 36(2): 178-184.
- [24] 王希华, 黄建军, 闫恩荣. 天童常绿阔叶林若干树种的叶片营养转移研究[J]. *广西植物*, 2004, 24(1): 81-85.
- [25] HUANG J, WANG X, YAN E. Leaf nutrient concentration, nutrient resorption and litter decomposition in an evergreen broad-leaved forest in eastern China[J]. *Forest Ecol Manag*, 2007, 239(1): 150-158.
- [26] TANG L, HAN W, CHEN Y, et al. Resorption proficiency and efficiency of leaf nutrients in woody plants in eastern China[J]. *J Plant Ecol-UK*, 2013, 6(5): 408-417.
- [27] AERTS R. Interspecific competition in natural plant communities: mechanisms, trade-offs and plant-soil feedbacks[J]. *J Exp Bot*, 1999, 50(330): 29-37.
- [28] HAN W, FANG J, GUO D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytol*, 2005, 168(2): 377-385.
- [29] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. *P Natl Acad Sci USA*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [30] ELSER J J, FAGAN W F, DENNO R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580.
- [31] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(12): 2665-2673.
- [32] WU T G, YU M K, WANG G G, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across forty-two woody species in Southeast China[J]. *Biochem Syst Ecol*, 2012, 44: 255-263.
- [33] WARDLE D A, WALKER L R, BARDGETT R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences[J]. *Science*, 2004, 305(5683): 509-513.
- [34] 张庆费, 宋永昌, 由文辉. 浙江天童植物群落次生演替与土壤肥力的关系[J]. *生态学报*, 1999, 19(2): 174-178.
- [35] 阎恩荣, 王希华, 周武. 天童常绿阔叶林不同退化群落的凋落物特征及与土壤养分动态的关系[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 1-12.
- [36] AERTS R, CORNELISSEN J H C, VAN 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.
- [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]. *植物科学学报*, 1999, 17(S1): 117-122.
- [38] 吴锡麟, 叶功富, 张尚炬, 等. 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.
- [39] JIANG C, YU G, LI Y, et al. Nutrient resorption of coexistence species in alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau explains plant adaptation to nutrient-poor environment[J]. *Ecol Eng*, 2012, 44: 1-9.
- [40] 阎恩荣, 王希华, 郭明, 等. 浙江天童常绿阔叶林, 常绿针叶林与落叶阔叶林的 C: N: P 化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 48-57.