

董振洁, 郭亚茹, 侯琳. 秦岭华山松营养诊断与林地施肥. 应用生态学报, 2022, 33(8): 2051-2056

Dong Z-J, Guo Y-R, Hou L. Nutrition diagnosis and fertilization of *Pinus armandii* forest in the Qinling Mountains, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(8): 2051-2056

秦岭华山松营养诊断与林地施肥

董振洁¹ 郭亚茹¹ 侯琳^{1,2*}

(¹西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100; ²陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 陕西宁陕 711603)

摘要 以陕西秦岭南坡华山松天然林为对象, 采集华山松针叶、凋落物、土壤样品, 测定全氮(TN)和全磷(TP)含量, 开展华山松林木营养诊断, 分析华山松林养分限制格局, 研究促进华山松正常生长的施肥种类和施肥量, 为林地精准施肥和科学培育华山松大径材提供支持。结果表明: 华山松大径材率(胸径 DBH > 26 cm)为 29.0%, 具有成长为大径材潜力的华山松个体(18 cm < DBH ≤ 26 cm)比率为 60.6%。华山松针叶 N、P 含量分别为 12.65 和 1.34 g · kg⁻¹, N : P 为 10.24 (< 14 的林木生长不受限阈值); N、P 回收效率分别为 33.8% 和 48.0%。在 0~10 cm 土层, 土壤与华山松针叶的 N、P 含量呈显著负相关, 凋落物与土壤的 N、P 含量呈显著正相关, 土壤 N 储量与华山松针叶 N : P 呈显著二次函数关系。华山松正常生长受土壤 N 限制, 在林地补充 0.42 t N · hm⁻² 可解除华山松生长限制。为快速培育大径材, 宜向林地内具有成长为大径材潜力的个体施 0.16 t N · hm⁻², 按单位面积内林木个体生物量比例进行单株氮素分配。

关键词 华山松; 大径材; 营养诊断; 施肥; 养分回收效率

Nutrition diagnosis and fertilization of *Pinus armandii* forest in the Qinling Mountains, China. DONG Zhen-jie¹, GUO Ya-ru¹, HOU Lin^{1,2*} (¹College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Qinling National Forest Ecosystem Research Station, Ningshan 711603, Shaanxi, China).

Abstract: We examined the contents of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in needle, litter, and soil of *Pinus armandii* forest on the southern slope of the Qinling Mountains in Shaanxi, China. We conducted nutrition diagnosis of *P. armandii* forest, analyzed nutrient limitation pattern, the fertilization types and amount to increase growth, to provide support for precision fertilization and scientific cultivation of big timber of *P. armandii*. The results showed that the proportion of big timber (DBH > 26 cm) and individuals with the potential to grow into big timber (18 cm < DBH ≤ 26 cm) was 29.0% and 60.6%, respectively. The needle N and P contents were 12.65 and 1.34 g · kg⁻¹, respectively, and the N : P was 10.24 (< 14, unrestricted threshold of forest growth). The N and P resorption efficiency of needle was 33.8% and 48.0%, respectively. In 0-10 cm soil layer, soil N and P contents were significantly negatively correlated with that in the needle, but positively correlated with that in litter. The relationship between the needle N : P and soil N storage was expressed by a quadratic function. The growth of *P. armandii* was N limited, and an addition rate of 0.42 t N · hm⁻² would ensure normal growth of all individual trees. We recommended the rate of 0.16 t N · hm⁻² to the trees with the potential to grow into big timber to promote them to be big timber in a short period, allocating nitrogen to individual plants in proportion to the biomass of individual trees in the stand per unit area.

Key words: *Pinus armandii*; big timber; nutrition diagnosis; fertilization; nutrient resorption efficiency.

自 1998 年实施的天然林保护工程(NFPP)有效促进了我国生态脆弱地区的植被恢复和生物多样性增加^[1]。但禁伐导致木材自给能力下降^[2], 加剧了对木材进口的依赖性, 当前我国木材对外依存度高达 50%^[3], 需要自主培育大径材(胸径 DBH > 26 cm)从而满足国内木材消耗的迫切需求^[4]。

林地施肥作为快速有效的培育措施, 能够促进林木材积增长, 维持林地养分平衡。由于树种的生物学、生态学特性以及土壤类型的差异, 因地制宜地确定合理的肥料种类和适宜的施肥量是林木培育的关键^[5]。以往林地施肥研究中, 肥料种类与施用量绝大多数根据林木叶片缺素症或研究者的经验确定, 缺乏科学依据^[6-9]。生态化学计量学理论主要关注林木和林地土壤营养元素含量与比例关系(C : N : P)^[10], 为林地施肥提供了思路。以往有关

本文由国家重点研发计划项目(2017YFD0600504-2)资助。

2021-10-19 收稿, 2021-12-15 接受。

* 通讯作者 E-mail: houlin_1969@nwsuaf.edu.cn

生态化学计量的研究,多集中于不同区域多种典型植物叶片、凋落物,以及土壤的 C、N、P 含量及其化学计量特征^[11-14],限制林木正常生长的营养元素种类^[15-17],模拟氮沉降等背景下植物、凋落物和土壤的养分含量及化学计量特征的变化,以及全球变化对森林生物地球化学循环的影响^[18-20]。已有研究明确了限制植物正常生长的植物叶片生态化学计量特征^[21-24],然而以此确定施肥种类以及制定合理施肥量的研究尚不多见。

华山松(*Pinus armandii*)是我国特有树种,在提供木材和生态环境保护等方面发挥着重要作用,但因其凋落物富含木质素、纤维素,且华山松林多分布于中、高海拔地带,气温低、凋落物分解不良,致使营养元素循环受阻,林地肥力低下,林木生长缓慢^[25]。本研究基于华山松林生态化学计量特征,分析其养分限制格局,研究促进林木正常生长的施肥种类和施用量,为华山松大径材科学培育提供支持。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省宝鸡市凤县境内通天河国家森林公园(34°10′—34°20′ N, 106°28′—106°38′ E),地处陕西秦岭西部南坡、秦岭主梁南侧嘉陵江上游。林区海拔 1580~2739 m,整体地势西北高、东南低,属暖温带半湿润山地气候,年均气温 7.6 °C,年均降水量 1097 mm,降水集中于 7—9 月;土壤类型以黄棕壤、棕壤为主。该区森林覆盖率为 96.8%,林区资源丰富,自然植被以天然次生林群落为主,主要成林树种有华山松、锐齿槲栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)等。

1.2 样地设置

2019 年 5 月,在试验区选取立地条件相似的 20 m×20 m 华山松天然林固定样地 25 块。样地海拔 1605~1880 m,坡度 18~42°,坡向 122~278°,林分密度 275~433 株·hm⁻²,郁闭度 0.4~0.8,平均胸径(22.03±2.77) cm,林龄 41~60 年,凋落物厚度 2~4 cm。

对样地内 DBH≥5 cm 的华山松个体进行每木检尺^[26],并在胸径处用油漆进行标注、编号。将树木按径级分组,4 cm 为一个径级,用中径表示,即:6.0 cm<DBH≤10.0 cm,中径为 8 cm。在每个径级范围内选择 3 株标准木,用生长锥在胸径处钻取树芯,带回实验室后进行抛光并染色,通过年轮分析仪确定林龄^[27]。

1.3 样品采集与处理

根据平均胸径法在各个样地内选取 5 株华山松标准木,采集针叶、凋落物、土壤样品进行营养诊断。针叶用高枝剪在树体东、西、南、北 4 个方向剪取。用 30 cm×30 cm 凋落物收集器按对角线法收集凋落物。在剔除凋落物和腐殖质后,按对角线法布设土壤样品采集点,剔除凋落物后,采集表层(0~10 cm)土壤样品,用环刀采集原状土用于土壤容重的测定,再收集散土用于全氮(TN)和全磷(TP)含量测定。全氮(TN)含量采用半微量凯氏定氮法测定,全磷(TP)含量采用钼锑抗比色法测定^[28]。

1.4 数据处理

1.4.1 华山松生物量 根据陈存根等^[29]的华山松生物量模型计算生物量(表 1)。

1.4.2 华山松针叶和凋落物 N、P 储量 根据 Hou 等^[4]的方法计算:

$$D_1 = W \times R$$

式中: D_1 为华山松针叶和凋落物的 N、P 储量($t \cdot \text{hm}^{-2}$); W 为华山松针叶和凋落物的生物量($t \cdot \text{hm}^{-2}$); R 为华山松针叶和凋落物的 N、P 含量($g \cdot \text{kg}^{-1}$)。

1.4.3 华山松林地土壤 N、P 储量 根据谭玲等^[30]的方法计算:

$$D_2 = 0.1 \times C \times E \times F$$

式中: D_2 为 0~10 cm 土层的 N、P 储量($t \cdot \text{hm}^{-2}$); C 为土壤 N、P 含量($g \cdot \text{kg}^{-1}$); E 为土层厚度 10 cm; F 为土壤容重($g \cdot \text{cm}^{-3}$)。

1.4.4 华山松针叶 N、P 养分回收效率 养分回收效率采用基于重量的计算公式^[19]:

$$\text{NuRE} = (1 - R_1/R_2 \times 0.745) \times 100\%$$

式中:NuRE 为华山松针叶 N 或 P 养分回收效率; R_1 和 R_2 分别为华山松凋落物和针叶中 N、P 含量($g \cdot \text{kg}^{-1}$);0.745 是针叶树种的重量损失修正因子。

表 1 华山松生物量模型

Table 1 Regression model of *Pinus armandii* biomass

器官 Organ	生物量回归方程 Regression equation of biomass	R^2
干 Trunk	$\ln W_S = 1.02363 \ln(D^2 H) - 4.4997$	0.998
皮 Bark	$\ln W_{BA} = 0.88417 \ln(D^2 H) - 5.38472$	0.997
枝 Branch	$\ln W_B = 2.57551 \ln D - 4.08452$	0.987
针叶 Needle	$\ln W_N = 2.75687 \ln D - 5.75891$	0.980
根 Root	$\ln W_R = 0.9712 \ln(D^2 H) - 5.26301$	0.979

D : 胸径 Diameter at breast height; H : 树高 Tree height; W_S : 干生物量 Trunk biomass; W_{BA} : 皮生物量 Bark biomass; W_B : 枝生物量 Branch biomass; W_N : 针叶生物量 Needle biomass; W_R : 根生物量 Root biomass.

采用 SPSS 22.0 软件进行数据处理, 利用 Origin 2021 软件作图。华山松针叶、凋落物和土壤的 N:P 采用重量比表示。采用单因素 (one-way ANOVA) 和 Duncan 法对华山松针叶、凋落物和土壤的 N、P 含量和 N:P 进行方差分析和多重比较 ($\alpha = 0.05$)。采用 Pearson 法分析华山松针叶、土壤和凋落物的 N、P 含量和 N:P 之间的相关性。图表中数据为平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 华山松径级和生物量分布

从图 1 可以看出, 华山松大径材率 (DBH>26 cm) 为 29.0%, 具有成长为大径材潜力的华山松个体 (18 cm<DBH \leq 26 cm) 比率为 60.6%, 其生物量分别占林地内全部林木个体总生物量的 37.4% 和 37.6%。

2.2 华山松针叶与土壤、凋落物生态化学计量特征

从表 2 可以看出, 华山松针叶的 N 含量是凋落

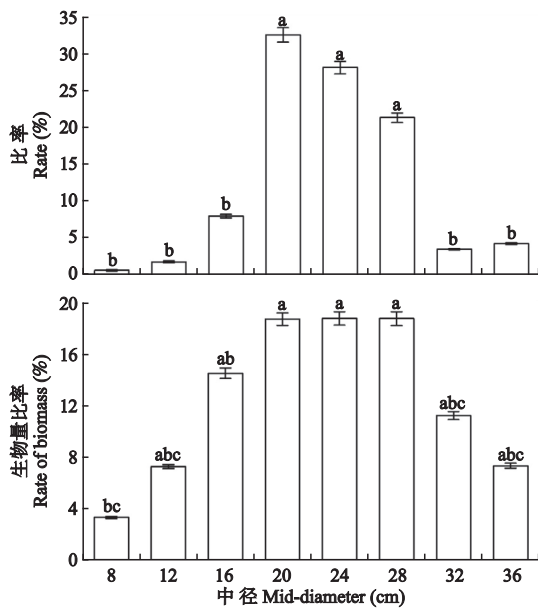


图 1 华山松径级和生物量分布

Fig. 1 Diameter classes and biomass distribution of *Pinus armandii*.

不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters meant significant difference at 0.05 level.

表 2 华山松针叶与凋落物、土壤生态化学计量特征

Table 2 Stoichiometric characteristics of needles with litter, and soil in *Pinus armandii* forest

组分 Component	N 含量 N content ($g \cdot kg^{-1}$)	P 含量 P content ($g \cdot kg^{-1}$)	N 储量 N storage ($t \cdot hm^{-2}$)	P 储量 P storage ($t \cdot hm^{-2}$)	N:P	N 回收效率 N resorption efficiency (%)	P 回收效率 P resorption efficiency (%)
针叶 Needle	12.65 \pm 0.72a	1.34 \pm 0.39a	0.09 \pm 0.01b	0.01 \pm 0.00b	10.24 \pm 2.95b	33.8 \pm 1.3	48.0 \pm 2.0
凋落物 Litter	11.18 \pm 0.78b	0.84 \pm 0.09b	0.12 \pm 0.01b	0.01 \pm 0.00b	13.47 \pm 1.02a		
土壤 Soil	2.97 \pm 0.26c	0.48 \pm 0.05c	3.38 \pm 0.34a	0.54 \pm 0.07a	6.27 \pm 0.51c		

同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column meant significant difference at 0.05 level.

物的 1.1 倍, 是土壤的 4.3 倍, 三者之间差异显著。针叶的 P 含量显著高于凋落物和土壤。凋落物和针叶的 N:P 高于土壤, 三者之间具有显著差异。土壤 N 储量显著高于针叶和凋落物, 是后者的 37.6 和 28.2 倍, 针叶的 N 储量和凋落物 N 储量差异不显著。针叶和凋落物的 P 储量显著低于土壤 P 储量, 均仅为土壤的 1.9%。华山松针叶 N 回收效率为 33.8%, P 回收效率为 48.0%。

2.3 华山松针叶与土壤、凋落物生态化学计量特征的关系

由表 3 可以看出, 华山松针叶 N 含量与 P 含量呈显著正相关, 与土壤 N 含量呈显著负相关, 凋落物 N、P 含量对针叶 N 含量影响不显著。针叶 P 含量与土壤、凋落物的 N、P 含量都呈显著负相关。针叶 N:P 与针叶 N 含量相关性不显著, 与针叶 P 含量呈显著负相关, 与土壤、凋落物的 N、P 含量都呈显著正相关。凋落物 N、P 含量与土壤 N、P 含量及 N:P 均呈显著正相关 (表 4)。

2.4 华山松养分限制格局与施肥方案

有研究表明, N 浓度 $< 20 mg \cdot g^{-1}$ 和 N:P < 14 时, 植物生长受到 N 限制; 而 P 浓度 $< 1 mg \cdot g^{-1}$ 和 N:P > 16 时, 植物生长受到 P 限制^[21-22]。当 N 和 P 的浓度和比例满足这些条件时, N 和 P 将发生共限制^[21-22]。为此, 研究区华山松针叶 N:P (10.24) 和 N 浓度 ($12.65 mg \cdot g^{-1}$) 显示出 N 限制 (表 2)。

如图 2 所示, 华山松针叶 N:P 与土壤 N 储量具有显著的二次函数关系, 表达式为 $y = 7.57x^2 - 16.16x + 10.68$, $R^2 = 0.64$ 。当针叶 N:P 达到阈值 14 时, 华山松生长不受 N 限制^[21-22]。根据表达式, 林木生长不受 N 限制时, 华山松林地土壤中 N 储量应为 $3.84 t \cdot hm^{-2}$ 。目前, 华山松林地土壤 N 储量为 $3.38 t \cdot hm^{-2}$, 凋落物 N 储量为 $0.12 t \cdot hm^{-2}$, 华山松针叶 N 回收效率为 33.8% (表 2), 为此可以推断, 在林地内施用 $0.42 t N \cdot hm^{-2}$ 可以解除 N 对华山松所有个体生长的限制。在林地施肥实践中, 为短时间内提高大径材比例, 可以按照大径材林木个体生物

表 3 华山松针叶与凋落物、土壤生态化学计量特征的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of the stoichiometric characteristics of *Pinus armandii* needles with litter and soil

		针叶 Needle		
		N	P	N : P
针叶	P	0.579 *		
Needle	N : P	-0.340	-0.939 **	
土壤	N	-0.615 **	-0.762 **	0.720 **
Soil	P	-0.356	-0.676 **	0.692 **
	N : P	-0.216	0.023	-0.087
凋落物	N	-0.468	-0.844 **	0.872 **
Litter	P	-0.322	-0.626 **	0.672 **
	N : P	0.051	0.155	-0.205

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. 下同 The same below.

表 4 华山松林土壤与凋落物生态化学计量特征的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between the stoichiometric characteristics of soil and litter in *Pinus armandii* forest

		土壤 Soil		
		N	P	N : P
凋落物	N	0.845 **	0.766 **	0.872 **
Litter	P	0.588 *	0.594 **	0.672 **
	N : P	-0.133	-0.201	-0.205

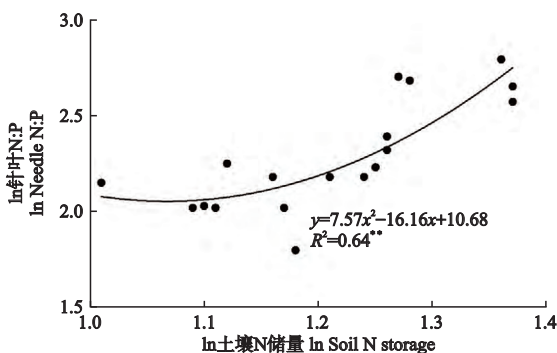


图 2 华山松针叶 N : P 和林地土壤 N 储量的回归关系

Fig.2 Regression relationship between N : P in *Pinus armandii* needles and soil N storage.

量占林地内所有林木个体总生物量的比例,确定林木施肥方案。本研究中,具有培育成大径材潜力的华山松个体 ($18 \text{ cm} < \text{DBH} \leq 26 \text{ cm}$) 生物量占林地内全部林木个体总生物量的 37.6%,因此宜向林地中施 $0.16 \text{ t N} \cdot \text{hm}^{-2}$,有利于华山松大径材培育。

3 讨 论

3.1 华山松针叶 N、P 化学计量特征

华山松针叶的 N、P 含量呈显著正相关(表 3),体现了植物对养分利用效率的权衡策略^[21]。本研究中,华山松针叶 N 含量 ($12.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 明显低于我国西南林区 ($23.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[19] 以及滇中亚高山

地区 ($24.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[20],而 P 含量 ($1.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 则高于西南林区 ($1.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[19],低于滇中亚高山地区 ($1.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[20],N : P (10.24) 低于后两者 (14.88、15.31)^[19-20]。植物叶片的营养元素浓度和比例是由遗传和生理活动控制的,与植物自身结构功能特点和生长发育阶段有关^[31],可能是这些关键因素阻碍了植物对可利用性营养物质的吸收。土壤条件反映了植物营养状况,本研究中华山松林土壤 N、P 含量 (2.97 和 $0.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 均低于西南林区 (3.76 和 $0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[19],高于滇中亚高山地区 (0.69 和 $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[20],陆生植物通过岩石风化和微生物分解作用获得营养物质,这一特性使得植物营养状况形成区域差异特征^[32]。本研究区温度(年均温 $7.6 \text{ }^\circ\text{C}$) 明显低于西南地区(年均温 $8.9 \text{ }^\circ\text{C}$)^[19] 和滇中亚高山地区(年均温 $15 \text{ }^\circ\text{C}$)^[20],这可能阻碍了岩石风化和微生物活动。低温减缓了凋落物的分解,且针叶林凋落物富含单宁等难分解物质,分解过程中产生的残余酸性物质使土壤酸化,影响微生物活动,进一步抑制凋落物分解,降低土壤 N 输入^[33]。

3.2 凋落物与土壤 N、P 化学计量特征

凋落物分解和岩石风化是天然林矿质土壤的主要养分来源。本研究表明,凋落物中 N、P 含量与土壤 N、P 含量呈显著正相关(表 4),土壤中 N 和 P 含量较低(表 2),原因可能是凋落物中的高不溶性化合物和低温减缓了凋落物的分解^[34]。华山松针叶和土壤的 N、P 含量之间呈显著负相关(表 3),表明养分元素在循环过程中具有明显的耦合性^[35]。作为重要的 N 库、P 库的蛋白质和 rRNA 始终保持一致性,两者之间相互作用使得植物生长过程中 N 和 P 也具有一致性^[36]。此外,植物吸收的土壤有效氮和磷具有很强的流动性^[37]。研究区域的矿质土壤土层薄,降水量高 ($800 \sim 1200 \text{ mm}$) 以及低温^[38] 可能加速了凋落物和土壤中 N 和 P 的淋溶,使植物叶片吸收的 N 和 P 更少。

3.3 华山松养分限制

植物叶片养分浓度及其化学计量比是预测和判断树木生长养分限制状况的重要因子。叶片 N : P 比养分浓度更能反映 N 或 P 的缺乏^[23]。根据 Koerselman 等^[21] 和 Aerts 等^[22] 提出的养分限制标准,研究区华山松针叶 N : P (10.24) 和 N 浓度 ($12.65 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 显示出 N 限制。然而,更保守的 N : P 阈值是 N 限制 < 10 , P 限制 > 20 ^[23-24]。由于有多种评估养分限制的标准^[21-24],目前缺乏足够的证据更准确地确定林木养分限制条件,此方面尚需深

入研究。

3.4 林地施肥方案

本研究中, 华山松 N、P 回收效率为 33.8% 和 48.0%, 明显低于我国西南林区 (约为 70% 和 80%)^[19], 可能是本研究区气温低、针叶寿命长导致养分回收效率低。结合养分回收效率, 本研究得到, 在林地内施用 $0.42 \text{ t N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 可以解除 N 对华山松所有个体生长的限制, 先前的研究表明, 松栎混交林正常生长发育受到 N 限制^[4], 解除 N 限制需向林地施 $1.49 \text{ t N} \cdot \text{hm}^{-2}$, 但施肥量计算忽略了植物叶片养分回收效率这一关键因素。本研究提出了一种通用的林木施肥方法, 即首先利用生态化学计量学相关理论判断限制林木正常生长的营养元素种类, 确定施肥种类, 再利用林木叶片 N:P 和林地土壤养分储量的回归关系, 并结合土壤、凋落物中的养分储量以及叶片养分回收效率计算林地总施肥量。为了快速提高大径材比例, 可以考虑仅对具有成长为大径材潜力的个体 ($18 \text{ cm} < \text{DBH} \leq 26 \text{ cm}$) 进行施肥。本研究中, 该部分华山松生物量占单位面积内林木总生物量的 37.6%, 因此宜向林地中施加 $0.16 \text{ t N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在施肥实践中, 可以按照单株林木生物量占单位面积内总生物量的比例计算单株施肥量。

参考文献

- [1] 刘世荣, 马姜明, 缪宁. 中国天然林保护、生态恢复与可持续经营的理论与技术. 生态学报, 2015, **35**(1): 212-218
- [2] Wang W, Pechacek P, Zhang MX, *et al.* Effectiveness of nature reserve system for conserving tropical forests: A statistical evaluation of Hainan Island, China. *PLoS One*, 2013, **8**(2): e57561
- [3] 闫小莉, 戴腾飞, 邢长山, 等. 水肥耦合对欧美 108 杨幼林表土层细根形态及分布的影响. 生态学报, 2015, **35**(11): 3692-3701
- [4] Hou L, Dong ZJ, Yang YY, *et al.* Applying foliar stoichiometric traits of plants to determine fertilization for a mixed pine-oak stand in the Qinling Mountains, China. *PeerJ*, 2018, **6**: e4628
- [5] 郑一, 张振, 范金根, 等. 磷肥对不同结实能力马尾松无性系雌球花量及针叶氮磷营养的影响. 应用生态学报, 2021, **32**(4): 1184-1192
- [6] 卢漫, 吴立潮, 吴建平, 等. 泡桐幼龄林配方施肥的初步研究. 中南林业科技大学学报: 自然科学版, 2010, **30**(6): 55-59
- [7] 刘福妹, 李天芳, 姜静, 等. 白桦最佳施肥配方的筛选及其各元素的作用分析. 北京林业大学学报, 2012, **34**(2): 57-60
- [8] 段春健, 宛颂, 叶桂萍, 等. 长期缺素施肥及石灰石膏施用对江西鹰潭红壤反硝化微生物功能基因丰度的影响. 应用生态学报, 2021, **32**(6): 2209-2216
- [9] 李瑞瑞, 卢艺, 王益明, 等. 墨西哥柏人工林土壤-叶片碳氮磷化学计量特征对不同施 N 量的响应. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2018, **39**(6): 26-32
- [10] He JS, Fang JY, Wang ZH, *et al.* Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China. *Oecologia*, 2006, **149**: 115-122
- [11] 刘旭艳, 胡宇坤. 大兴安岭典型森林沼泽植物叶片和细根碳氮磷化学计量特征. 应用生态学报, 2020, **31**(10): 3385-3394
- [12] 何茂松, 罗艳, 彭庆文, 等. 新疆 67 种荒漠植物叶碳氮磷计量特征及其与气候的关系. 应用生态学报, 2019, **30**(7): 2171-2180
- [13] 郑兴蕊, 宋娅丽, 王克勤, 等. 滇中常绿阔叶林凋落物养分释放及生态化学计量特征对模拟 N 沉降的响应. 应用生态学报, 2021, **32**(1): 23-30
- [14] Han WX, Fang JX, Guo DL, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, **168**: 377-385
- [15] Wang N, Fu FZ, Wang BT, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Pinus tabulaeformis* forest ecosystems in warm temperate Shanxi Province, North China. *Journal of Forestry Research*, 2018, **29**: 1665-1673
- [16] Pang DB, Wang GZ, Li GJ, *et al.* Ecological stoichiometric characteristics of two typical plantations in the karst ecosystem of Southwestern China. *Forests*, 2018, **9**: 56-64
- [17] Netzer F, Pozzi L, Dubbert D, *et al.* Improved photosynthesis and growth of poplar during nitrogen fertilization is accompanied by phosphorus depletion that indicates phosphorus remobilization from older stem tissues. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, **162**: 421-432
- [18] 陈微微, 寇亮, 蒋蕾, 等. 亚热带湿地松叶片多元素化学计量与养分回收对氮添加的短期响应. 应用生态学报, 2017, **28**(4): 1094-1102
- [19] 尹明珍, 郭婉玢, 朱晓敏, 等. 氮沉降下西南高山针叶林生长的养分限制特征. 应用与环境生物学报, 2021, **27**(1): 1-7
- [20] 张雨鉴, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中亚高山森林植物叶-凋落叶-土壤生态化学计量特征. 生态学报, 2020, **40**(21): 7648-7658
- [21] Koerselman W, Meuleman AFM. The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 1996, **33**: 1441-1450
- [22] Aerts R, Chapin III FS. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, 1999, **30**: 1-67
- [23] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance. *New Phytologist*, 2004, **164**: 243-266
- [24] Sardans J, Alonso R, Carnicer J, *et al.* Factors influencing the foliar elemental composition and stoichiometry in forest trees in Spain. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2012, **18**: 52-69
- [25] 陈文静, 祁凯斌, 黄俊胜, 等. 川西次生灌丛和不同

- 类型人工林对土壤养分的影响. 应用与环境生物学报, 2017, **23**(6): 1081-1088
- [26] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. 生物多样性, 2009, **17**(6): 533-548
- [27] 李春明, 赵丽芳, 李利学. 基于混合效应模型和零膨胀模型方法的蒙古栎林分水平枯损模型. 林业科学, 2019, **55**(11): 27-36
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [29] 陈存根, 彭鸿. 秦岭火地塘林区主要森林类型的现存量 and 生产力. 西北林学院学报, 1996, **11**(增刊): 92-102
- [30] 谭玲, 何友均, 覃林, 等. 南亚热带红椎、马尾松纯林及其混交林土壤理化性质比较. 西部林业科学, 2014, **43**(2): 35-41
- [31] Castle SC, Neff JC. Plant response to nutrient availability across variable bedrock geologies. *Ecosystems*, 2009, **12**: 101-113
- [32] Chadwick OA, Derry LA, Vitousek PM, *et al.* Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. *Nature*, 1999, **397**: 491-497
- [33] Bauhus J, Paré D, Côté L. Effects of tree species, stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in a southern boreal forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**: 1077-1089
- [34] Hou L, Sun S, Liang LY, *et al.* Effects of selective thinning and residue removal on ground layer structure and diversity in a mixed pine-oak stand of the Qinling Mountains, China. *Australian Journal of Botany*, 2017, **65**: 485-496
- [35] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明. 陕西省森林群落乔灌草叶片和凋落物 C、N、P 生态化学计量特征. 应用生态学报, 2016, **27**(2): 365-372
- [36] 李嘉竹, 王国安, 刘贤赵, 等. 贡嘎山东坡 C3 植物碳同位素组成及 C4 植物分布沿海拔高度的变化. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, **39**(10): 1387-1396
- [37] Thompson K, Parkinson JA, Band SR, *et al.* A comparative study of leaf nutrient concentrations in a regional herbaceous flora. *New Phytologist*, 2010, **136**: 679-689
- [38] 王志康, 许晨阳, 耿增超, 等. 基于扣除根系体积新方法的秦岭辛家山 2 种林分土壤有机碳密度特征. 林业科学, 2019, **55**(6): 133-141

作者简介 董振洁, 女, 1994 年生, 博士研究生。主要从事森林生态学研究。E-mail: dongzhenjie1994@nwafu.edu.cn

责任编辑 王 俊

责任编辑 孙 菊
