



氮磷添加及林分密度对大叶相思林土壤化学性质的影响

冯慧芳^{1,2} 刘落鱼¹ 薛立^{1*}

¹华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642; ²广东省森林资源保育中心, 广州 510173

摘要 大气氮(N)沉降随着人类的活动而日趋严重, 加上中国热带亚热带红壤普遍缺磷(P), 许多森林生态系统由于广泛使用磷肥而产生P富集, 直接影响了森林土壤化学特性。林分密度改变林地的光照、温度、湿度和凋落物持水量, 从而影响土壤特性。为了解外源性N和P添加与林分密度对大叶相思(*Acacia auriculiformis*)林地土壤化学性质的影响, 为大叶相思人工林的种植密度和土壤养分管理提供科学依据, 该研究于2013到2015年, 以4种不同密度(1 667、2 500、4 444和10 000 trees·hm⁻²)的10年生大叶相思人工林为研究对象, 分别进行添加N、P和N+P处理, 在试验结束时采集0–10 cm土壤, 对其pH、有机质含量、N含量、P含量和钾(K)含量进行了测定分析。结果表明: 施N和N+P均显著降低了土壤的pH和速效K含量, 显著提高了林地土壤的碱解N含量。施N还显著提高了林分土壤的全N含量, 施P显著提高了土壤pH, 降低了林分土壤的全N含量。施P和N+P显著提高了土壤有机质、全P和有效P含量。随着林分密度的增加, 各处理的土壤有机质、全N、碱解N、全P、有效P和速效K含量显著提高。N、P添加处理和密度处理对大叶相思林的土壤pH、有机质和N、P、K含量有显著的交互作用。总体来看, N添加、P添加、林分密度及其交互作用对大叶相思的土壤化学性质有显著影响。

关键词 大叶相思; 林分密度; 氮添加; 磷添加; 土壤化学性质; 交互作用

冯慧芳, 刘落鱼, 薛立 (2019). 氮磷添加及林分密度对大叶相思林土壤化学性质的影响. 植物生态学报, 43, 1010–1020. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0168

Effects of nitrogen and phosphorus additions and stand density on soil chemical property in *Acacia auriculiformis* stands

FENG Hui-Fang^{1,2}, LIU Luo-Yu¹, and XUE Li^{1*}

¹College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; and ²Forest Resources Conservation Center of Guangdong Province, Guangzhou 510173, China

Abstract

Aims Due to human activities, nitrogen (N) deposition is increasingly serious, and phosphorous (P) fertility is widely applied in the soils of subtropical forests suffering from P deficiency, but there are relatively few researches of N and P additions on soil characteristics of subtropical forests. Difference in stand density may affect light, temperature, water and litter water holding capacity, which may influence soil characteristics. The effects of external nitrogen and phosphorus and stand density on soil chemical property were investigated in 10 years-old *Acacia auriculiformis* stands in order to provide a scientific basis for stand density and forest soil management.

Methods In this study, five subsample plots were established in the stands with four densities (1 667, 2 500, 4 444 and 10 000 trees·hm⁻²) and treated with N addition, P addition, N+P addition and control from 2013 to 2015. At the end of experiment, soils at 0–10 cm depth with different treatments were collected and pH value, organic matter content, N, P and K contents were analyzed in the *A. auriculiformis* stands.

Important findings The results indicated that soil pH value and available potassium (K) content significantly decreased, whereas soil alkalized N content significantly increased after N and N+P additions in the four density stands, and soil total N content significantly increased after N addition. Soil pH value significantly increased and soil total N content significantly decreased after P addition. Contents of soil organic matter, total P and available P significantly increased after P and N+P additions. With the increase of stand density, the contents of soil organic

收稿日期Received: 2019-07-02 接受日期Accepted: 2019-10-06

基金项目: 中央财政林业科技推广示范项目(2015-GDTK-07)。Supported by Forestry Technology Popularization Demonstration Project of the Central Government (2015-GDTK-07).

* 通信作者Corresponding author (forxue@scau.edu.cn)

matter, total N, alkaline N, total P, available P and available K significantly increased. The interactive effects of density and N and P additions on soil pH value, organic matter, N, P and K contents were significant in the stands. Generally, the effects of N and P additions, stand density and the both interaction on soil chemistry property were significant.

Key words *Acacia auriculiformis*; stand density; nitrogen addition; phosphorus addition; soil chemical property; interaction

Feng HF, Liu LY, Xue L (2019). Effects of nitrogen and phosphorus additions and stand density on soil chemical property in *Acacia auriculiformis* stands. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 1010–1020. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0168

由于经济的快速发展以及人类活动干扰的加剧, 全球的大气氮(N)沉降日趋严重(Vitousek *et al.*, 2010), 影响了N循环和平衡。长期的N沉降导致土壤无机N的增加和土壤酸化, 加速了土壤N饱和及N淋溶(Fang *et al.*, 2007)。中国N沉降量继欧洲和美国之后排第三位(Lu *et al.*, 2009), 例如广东省鼎湖山自然保护区近20年的N沉降速率超过 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (Fang *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2015)。土壤理化性质不仅受N沉降改变的影响, 且受到大气磷(P)沉降的影响。我国华南地区热带亚热带红壤普遍缺P, 影响林木生长, 因而许多森林生态系统由于广泛使用P肥而产生P富集。与N沉降的研究相比, 外源性P对森林土壤养分影响的研究非常薄弱(李洁和薛立, 2017)。因此, 在全球N沉降和P肥广泛应用的背景下, 研究外源性N和P对我国森林土壤化学性质的影响以及我国亚热带森林的养分管理具有重要的理论价值和广阔的应用前景。林分密度影响林地的光照、温度、湿度、凋落物持水量和土壤特性, 而这些因子对森林土壤养分有重要影响。近年来林分密度影响土壤特性的研究受到重视。例如, Lie等(2016)的研究表明, 白灰毛豆(*Tephrosia candida*)幼林密度影响土壤肥力; 冯宜明等(2018)报道, 中密度云杉(*Picea asperata*)人工幼林的土壤养分含量较高; 孙千惠等(2018)发现, 随着马尾松(*Pinus massoniana*)林密度的增大, 土壤有机质和全钾(K)含量均呈先增大后减小的趋势; 赵伟文等(2019)报道, 随着华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林林分密度的增加, 土壤有机质、全N、全P含量呈现先增大后减小的趋势; 董威等(2019)的研究表明, 油松(*Pinus tabulaeformis*)天然林林分密度适中时, 土壤碳、全N、全P含量较高; 王媚臻等(2019)发现, 有机质、全N、全K、速效K随柏木(*Cupressus funebris*)人工林密度降低呈先增后减趋势。尽管林婉奇等(2019)研究了N、P添加与不同栽植密度交互对樟树(*Cinnamomum*

camphora)盆栽幼苗土壤的短期影响, 尚未见到二者交互作用对林分土壤影响的报道。

大叶相思(*Acacia auriculiformis*)是含羞草科金合欢属速生乔木树种, 能够通过根瘤菌固N, 更好地提高土壤肥力, 增加土壤固碳, 是华南造林绿化、改良土壤、水土保持和滨海防风固沙的主要树种。国内外对于大叶相思的研究集中在种子萌发(Ellis *et al.*, 2007; 韦如萍等, 2009; Azad *et al.*, 2011; 詹妮和黄烈健, 2016)、生长(Kumar *et al.*, 2011; Srivastava *et al.*, 2014)、土壤(许松葵等, 2006, 2008; 唐国勇等, 2015; Chen *et al.*, 2016)、生物量(梁丽丽等, 2009; Feng & Xue, 2019)和凋落物分解(Feng *et al.*, 2018)等方面。外源性N、P和林分密度对大叶相思人工林土壤养分的交互影响尚未见报道。由于外源性N、P和林分密度会通过改变林木个体的竞争和生长而改变土壤养分状况, 具体探究三者及其交互作用如何影响土壤化学性质, 可为大叶相思人工林的种植密度和土壤养分管理提供参考, 解决华南地区大叶相思林林分种植密度及N沉降和P添加带来的影响林木生长的问题。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验研究地设在惠州市惠城区小金口(114.30°–114.54° E, 22.95°–23.27° N), 属亚热带季风气候。年平均气温19.5–22.1 °C, 7月份平均气温28.3 °C, 1月份平均气温13.1 °C。无霜期350–357天。年降水量1 690–2 380 mm, 多集中在4–9月, 占年降水量的80%–85%。土壤属赤红壤。

1.2 研究方法

2003年4月在惠州小金口的火烧马尾松林迹地, 割除林地上的芒草(*Miscanthus sinensis*)、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)等杂草和藤类后, 块状开穴(规格50 cm × 50 cm × 40 cm), 按1 667 (低密度)、

2 500 (中密度)、4 444 (较高密度)、10 000 (高密度) 株·hm⁻²栽植苗高约1 m的当年生大叶相思实生苗各2 hm²。2013年4月, 在4种密度的大叶相思人工林各建立1个面积为0.4 hm² (50 m × 80 m)的样地用于不同施肥方案试验。林分在施肥试验前, 没有进行施肥除草等经营活动。这些地块彼此相距30 m以内, 所处环境条件相似。在4种密度的样地内分别设5个5 m × 5 m的小样方(即5个重复)。每个小样方内分对照(CK)、加N、加P、加N+P 4种处理。各处理之间设至少3 m的缓冲带(Feng *et al.*, 2018; 余汉基等, 2018)。样方内外源N和P每年的添加量为N肥5 g·m⁻²·a⁻¹, P肥2 g·m⁻²·a⁻¹, N肥5 g·m⁻²·a⁻¹ + P肥2 g·m⁻²·a⁻¹, 2013年4月开始每隔3个月对小样方进行地表喷洒处理, 到2015年3月完成试验。N肥选用NH₄Cl, P肥选用NaH₂PO₄·2H₂O, 具体操作如下: 将各处理所需的肥料溶解至1 L的水中, 用喷雾器均匀喷洒在土壤表面, CK则喷洒相同体积的水。2013年试验地4种密度林分的基本特征详见表1。

1.3 土壤化学性质测定

2015年3月, 试验结束时采用五点取样法用直径2 cm、深10 cm的取土钻取各密度林分的5个小样方的CK、加N、加P和加N+P处理的0–10 cm土壤约0.5 kg, 带回实验室用于土壤养分的测定。土壤pH采用水土2.5:1混合后用pH计测定; 有机质用重铬

酸钾容量法测定; 全N用半微量凯氏法测定; 用氢氧化钠碱熔法将土壤样品熔融后提取待测液, 用钼蓝比色法测全P, 火焰光度计测全K; 碱解N用碱解扩散法测定; 用0.5 mol·L⁻¹的NaHCO₃提取土壤样品后, 用钼蓝比色法测速效P; 用1 mol·L⁻¹的中性醋酸提取土壤样品后, 用火焰光度计测速效钾(鲁如坤, 2000)。

1.4 数据处理

运用Microsoft Excel 2003对土壤化学性质指标进行处理并作图; 采用SAS 8.2对数据进行多重比较, 对各处理的土壤化学性质采用Duncan's法进行多重比较。

2 结果和分析

2.1 不同处理大叶相思林的土壤pH和有机质

大叶相思林4个密度林分各处理的pH范围为3.19–4.52, 属于酸性土壤(图1)。各处理的土壤pH随着林分密度增加没有呈现有规律的变化。与CK相比, 添加N和N+P处理引起各密度林分土壤pH的显著下降($p < 0.05$), 添加P处理的低密度和中密度林分土壤的pH显著提高($p < 0.05$), 而较高密度和高密度林分有所提高。

大叶相思林4个密度林分各处理的有机质含量范围为22.56–45.36 g·kg⁻¹ (图2)。随着林分密度的增加, 各处理土壤有机质含量显著增加($p < 0.05$)。与

表1 大叶相思林分的基本特征

Table 1 Characteristics of the *Acacia auriculiformis* stands

林分 Stand	林龄 Stand age (a)	郁闭度 Canopy density	密度 Density (trees·hm ⁻²)	胸径 Diameter at breast height (cm)	树高 Tree height (m)	坡向 Aspect	坡度 Slope (°)	主要林下植物 Main undergrowth plant
低密度 Low density	10	0.65	1 667	11.4	11.2	SW 43°	28	桃金娘、芒草、玉叶金花、梅叶冬青、了哥王、米碎花、滇牡丹、黑面神 <i>Rhodomyrtus tomentosa</i> , <i>Miscanthus sinensis</i> , <i>Mussaenda pubescens</i> , <i>Ilex asprella</i> , <i>Wikstroemia indica</i> , <i>Eurya chinensis</i> , <i>Paeonia delavayi</i> , <i>Breynia fruticosa</i>
中密度 Medium density	10	0.70	2 500	10.6	10.2	SW 44°	31	玉叶金花、桃金娘、芒草、芒萁、梅叶冬青、米碎花 <i>M. pubescens</i> , <i>R. tomentosa</i> , <i>M. sinensis</i> , <i>Dicranopteris pedata</i> , <i>I. asprella</i> , <i>E. chinensis</i>
较高密度 Relatively high density	10	0.75	4 444	9.8	10.1	SW 44°	30	芒萁、芒草、桃金娘、梅叶冬青、玉叶金花、米碎花 <i>D. pedata</i> , <i>M. sinensis</i> , <i>R. tomentosa</i> , <i>I. asprella</i> , <i>M. pubescens</i> , <i>E. chinensis</i>
高密度 High density	10	0.80	10 000	8.6	11.1	SW 42°	27	玉叶金花、桃金娘、海金沙、芒草、芒萁、梅叶冬青 <i>M. pubescens</i> , <i>R. tomentosa</i> , <i>Lygodium japonicum</i> , <i>M. sinensis</i> , <i>D. pedata</i> , <i>I. asprella</i>

CK相比, N、P和N+P处理的低密度林分的土壤有机质分别减少了1%和增加了8%和9%, 中密度林分分别为保持不变、增加了10%和17%, 中高密度林分分别增加了5%、15%和14%, 高密度林分分别增加了4%、13%和27%。各密度林分在施P和N+P后的土壤有机质均比CK显著增加($p < 0.05$), 施N处理的高密度与CK无显著差异, 其余密度的显著大于CK ($p < 0.05$)。

2.2 不同处理大叶相思林的土壤N、P和K含量

大叶相思林4个密度林分各处理的土壤全N含

量范围为1.019–1.980 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图3)。各处理的土壤全N含量随着林分密度的增加而显著增加($p < 0.05$)。与CK相比, N和N+P处理的低密度林分的土壤全N分别增加了7%和9%, 中密度林分均增加了13%, 较高密度林分分别增加了5%和减少了2%, 高密度林分分别增加了15%和1%。P处理的低、中、较高和高密度林分分别减少了12%、5%、6%和7%。N处理的各密度林分土壤全N含量比CK均显著增加, P处理的各密度林分土壤全N含量减少或显著减少($p < 0.05$)。N+P处理的各密度林分的土壤全N含量

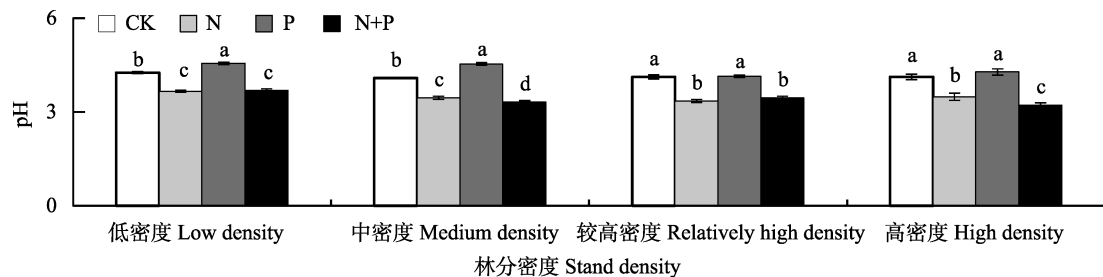


图1 不同处理和密度的大叶相思林土壤pH (平均值±标准误差)。CK, 对照; N, 添加N; P, 添加P; N+P, 添加N和P。不同小写字母表示氮、磷添加间有显著差异($p < 0.05$)。

Fig. 1 Soil pH value of the *Acacia auriculiformis* stands under different treatments and densities (mean \pm SE). CK, control; N, N addition; P, P addition; N+P, N and P addition. Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 levels between nitrogen and phosphorus additions ($p < 0.05$).

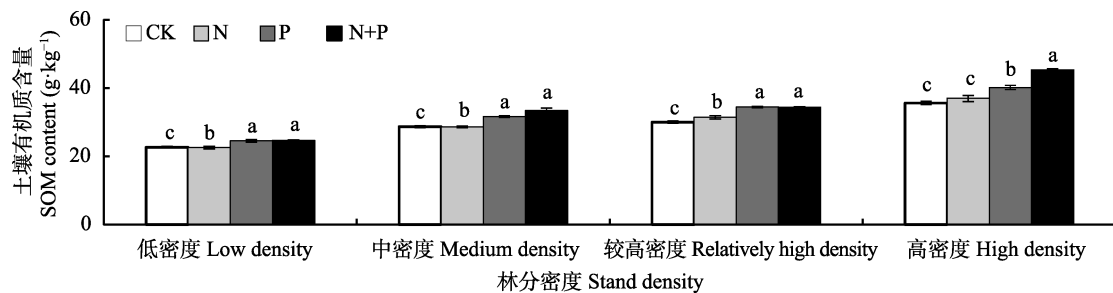


图2 不同处理和密度的大叶相思林的土壤有机质含量(平均值±标准误差)。CK, 对照; N, 添加N; P, 添加P; N+P, 添加N和P。不同小写字母表示氮、磷添加间有显著差异($p < 0.05$)。

Fig. 2 Soil organic matter (SOM) content of *Acacia auriculiformis* stands under different treatments and densities (mean \pm SE). CK, control; N, N addition; P, P addition; N+P, N and P addition. Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 levels between nitrogen and phosphorus additions ($p < 0.05$).

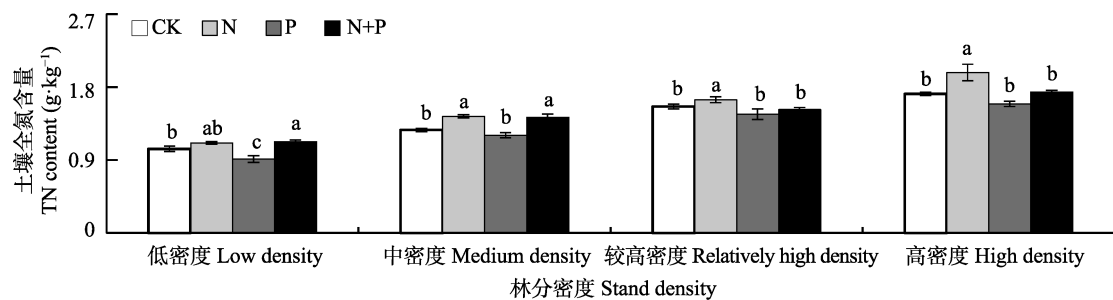


图3 不同处理和密度的大叶相思林的土壤全氮含量(平均值±标准误差)。CK, 对照; N, 添加N; P, 添加P; N+P, 添加N和P。不同小写字母表示氮、磷添加间有显著差异($p < 0.05$)。

Fig. 3 Soil total N (TN) content of *Acacia auriculiformis* stands under different treatments and densities (mean \pm SE). CK, control; N, N addition; P, P addition; N+P, N and P addition. Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 levels between nitrogen and phosphorus additions ($p < 0.05$).

显著增加($p < 0.05$)或增加。

大叶相思林4个密度林分各处理的碱解N含量的范围为53.32–216.13 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图4)。各处理的土壤碱解N含量随着林分密度的增加而显著增加($p < 0.05$)。与CK相比, N、P和N+P处理的低密度林分的土壤碱解N分别增加了192%、1%和99%, 中密度林分分别增加了125%、3%和49%, 中高密度林分分别增加了137%、减少了1%和增加了38%, 高密度林分分别增加了120%、5%和46%。N处理的土壤碱解N含量显著大于N+P处理($p < 0.05$), 后者显著大于对照和施P处理的($p < 0.05$)。各处理的土壤碱解N含量随着林分密度的增加而趋于增加。

大叶相思林4个密度林分各处理的全P含量范围为0.359–0.543 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图5)。各处理的土壤全P含量随着林分密度的增加而显著增加($p < 0.05$)。与CK相比, N处理的低、中、较高和高密度林分的土壤全P分别减少了10%、10%, 增加了13%和减少了4%。P和N+P处理的低密度林分的土壤全P分别增加了125%和78%, 中密度林分均增加了114%和59%, 较

高密度林分分别增加了140%和86%, 高密度林分分别增加了84%和43%。N处理的低密度和中密度林分土壤的全P含量比CK显著降低($p < 0.05$), 较高密度和高密度林分无显著差异。施P处理的各密度大叶相思林分的土壤全P含量均显著大于施N+P, 后者显著大于对照和施N处理的($p < 0.05$)。各处理随着林分密度的增加, 土壤全P含量趋于增加。

大叶相思林4个密度林分各处理的有效P含量范围为11.05–1.05 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图6)。各处理的土壤有效P含量随着林分密度的增加而显著增加($p < 0.05$)。与CK相比, N处理的低、中、较高和高密度林分的土壤全P分别减少了14%、8%、45%和增加了141%, P处理的分别增加了286%、295%、344%和452%, N+P处理的分别增加了91%、184%、209%和274%。施P处理的土壤有效P含量显著大于施N+P处理($p < 0.05$), 后者显著大于对照和施N处理的($p < 0.05$)。各处理随着林分密度的增加, 土壤有效P含量趋于增加。

大叶相思林4个密度林分各处理的全K含量范

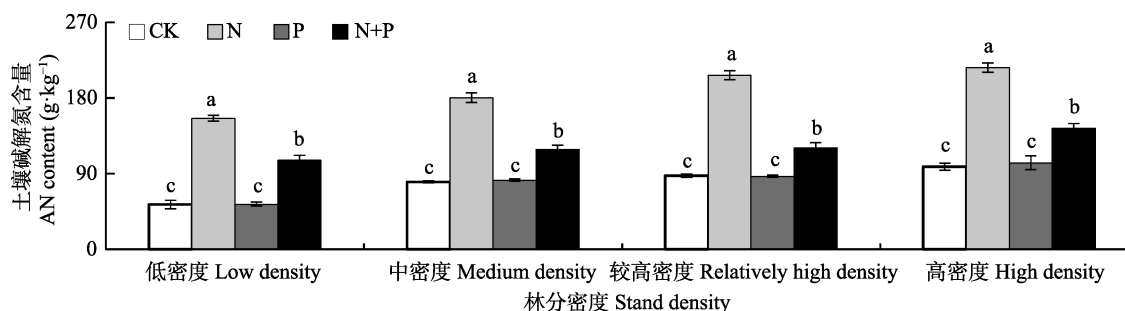


图4 不同处理和密度的大叶相思林的土壤碱解氮含量(平均值±标准误差)。CK, 对照; N, 添加N; P, 添加P; N+P, 添加N和P。不同小写字母表示氮、磷添加间有显著差异($p < 0.05$)。

Fig. 4 Soil alkaline N (AN) content of *Acacia auriculiformis* stands under different treatments and densities (mean \pm SE). CK, control; N, N addition; P, P addition; N+P, N and P addition. Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 levels between nitrogen and phosphorus additions ($p < 0.05$).

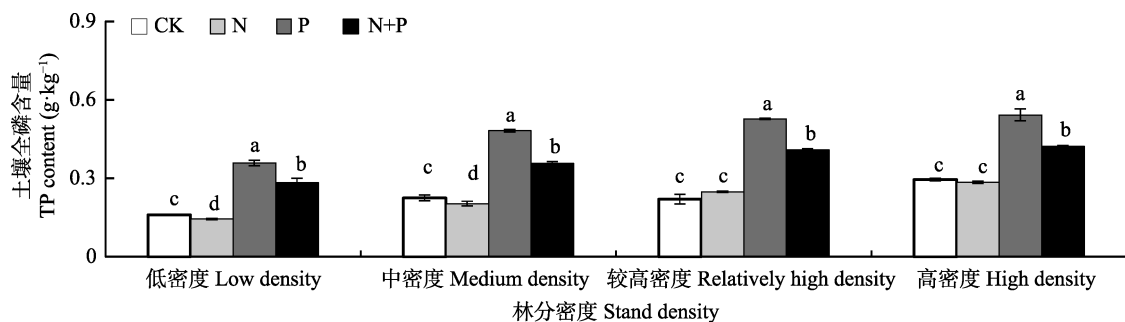


图5 不同处理和密度的大叶相思林的土壤全磷含量(平均值±标准误差)。CK, 对照; N, 添加N; P, 添加P; N+P, 添加N和P。不同小写字母表示氮、磷添加间有显著差异($p < 0.05$)。

Fig. 5 Soil total P (TP) content of *Acacia auriculiformis* stands under different treatments and densities (mean \pm SE). CK, control; N, N addition; P, P addition; N+P, N and P addition. Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 levels between nitrogen and phosphorus additions ($p < 0.05$).

围为18.32–25.61 g·kg⁻¹ (图7)。各处理的土壤全K含量随着林分密度的增加而趋于增加, 较高和高密度林分的土壤全K含量显著大于其他密度林分($p < 0.05$)。与CK相比, N处理的低、中、较高和高密度林分的土壤全K含量分别增加了2%、减少了2%、13%和保持不变。P处理分别较少了5%、6%、16%和增加了8%, N+P处理的分别减少了2%、1%、14%和增加了4%。施N、P和N+P后, 低密度、中密度和

高密度林分的土壤全K含量与对照无显著差异, 而较高密度林分的土壤全K含量显著低于对照($p < 0.05$)。

大叶相思林4个密度林分各处理的土壤速效K含量的范围为28.90–67.54 mg·kg⁻¹ (图8)。各处理的土壤速效K含量随着林分密度的增加而显著增加($p < 0.05$)。与CK相比, N处理的低、中、较高和高密度林分的土壤速效K分别减少了29%、24%、31%

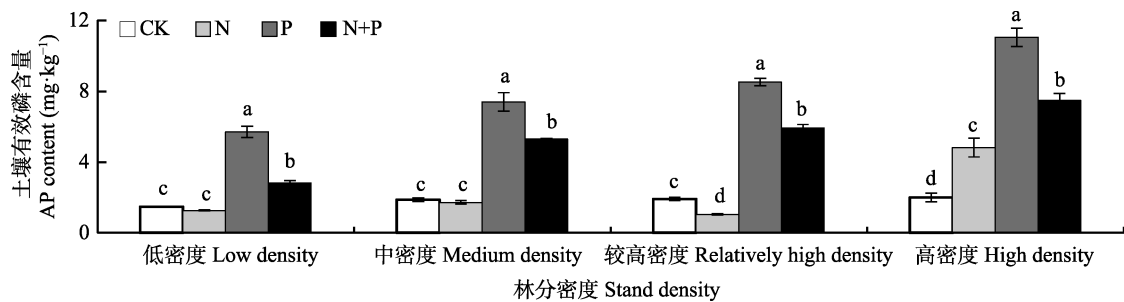


图6 不同处理和密度的大叶相思林的土壤有效磷含量(平均值±标准误差)。CK, 对照; N, 添加N; P, 添加P; N+P, 添加N和P。不同小写字母表示氮、磷添加间有显著差异($p < 0.05$)。

Fig. 6 Soil available P (AP) content of *Acacia auriculiformis* stands under different treatments and densities (mean ± SE). CK, control; N, N addition; P, P addition; N+P, N and P addition. Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 levels between nitrogen and phosphorus additions ($p < 0.05$).

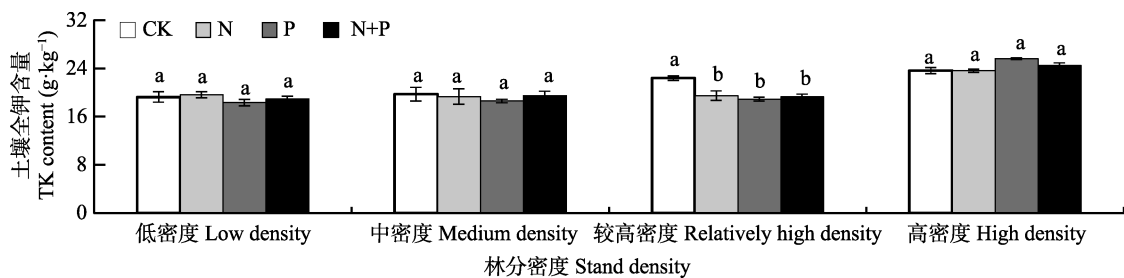


图7 不同处理和密度的大叶相思林的土壤全钾含量(平均值±标准误差)。CK, 对照; N, 添加N; P, 添加P; N+P, 添加N和P。不同小写字母表示氮、磷添加间有显著差异($p < 0.05$)。

Fig. 7 Soil total K (TK) content of *Acacia auriculiformis* stands under different treatments and densities (mean ± SE). CK, control; N, N addition; P, P addition; N+P, N and P addition. Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 levels between nitrogen and phosphorus additions ($p < 0.05$).

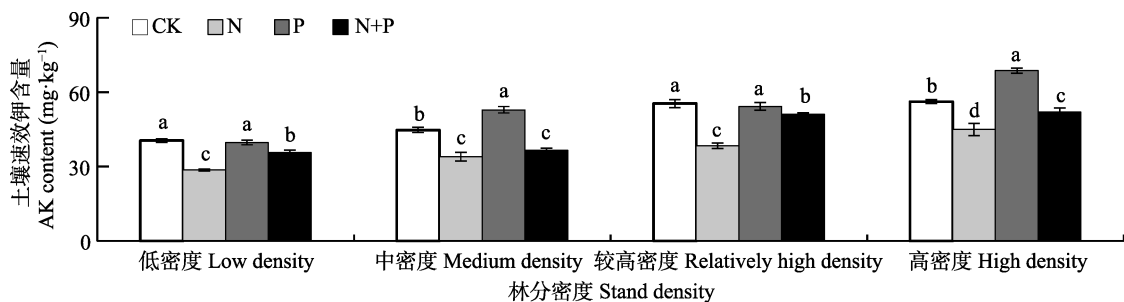


图8 不同处理和密度的大叶相思林的土壤速效钾含量(平均值±标准误差)。CK, 对照; N, 添加N; P, 添加P; N+P, 添加N和P。不同小写字母表示氮、磷添加间有显著差异($p < 0.05$)。

Fig. 8 Soil available K (AK) content of *Acacia auriculiformis* stands under different treatments and densities (mean ± SE). CK, control; N, N addition; P, P addition; N+P, N and P addition. Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 levels between nitrogen and phosphorus additions ($p < 0.05$).

和20%, P处理的分别减少了2%、增加了18%、减少了8%和增加了22%, N+P处理分别减少了12%、18%、8%和7%。施N后, 各密度林分土壤的速效K含量均显著低于对照($p < 0.05$)。施P和N+P后, 林分低密度和较高密度的土壤速效K含量与CK无显著差异。中密度和高密度的林分施P后, 土壤速效K含量显著大于对照($p < 0.05$), 施N+P后显著小于对照($p < 0.05$)。

2.3 外源性氮磷添加和林分密度对土壤化学性质的交互作用

由表2可知, 施肥处理对大叶相思人工林土壤的pH和所有养分指标均有显著影响($p < 0.05$), 密度处理显著影响了土壤pH, 并显著增加了土壤有机质和N、P、K含量($p < 0.05$)。施肥和密度处理的交互作用对以上指标也有显著影响($p < 0.05$)。

3 讨论和结论

3.1 氮磷添加对不同种植密度大叶相思林土壤pH和有机质的影响

本研究中, 外源性N和N+P添加均显著降低了4个密度林分的土壤pH, 而外源性P添加显著增加了4个密度林分土壤的pH。这是由于受到氮沉降的水平和持续时间的影响, 土壤发生N饱和和N淋失, 发生硝酸基的淋溶, 引起土壤酸化(Gundersen *et al.*, 2009; Lieb *et al.*, 2011; Wei *et al.*, 2012; 周丹燕等, 2015)。同时, 本研究中的NH₄Cl添加量可能超出该林分土壤的N饱和阈值, N饱和后NO₃⁻随雨水淋溶而流失, 带走大量的K⁺、Ca²⁺和Mg²⁺等阳离子, 而H⁺保留在系统中(Boxman *et al.*, 2008), 故引起土壤酸化(陈智等, 2010)。外源性P促使土壤中养分保持

平衡, 提高了植物吸收土壤N的效率, 减少了N淋失, 所以土壤pH上升。本研究中施N+P引起了土壤酸化, 表明N、P同时添加没有缓解NH₄⁺向NO₃⁻的转化或NO₃⁻的流失, 说明该处理中N起主要作用。

施P和N+P显著提高了土壤的有机质含量, 这与土壤添加有效P后, 满足了植物和土壤生物所需的有效养分, 减少了对有机质的矿质化速率有关。且由于森林土壤有机质来源于森林凋落物, N沉降加速了凋落物的分解, 但减缓了土壤旧有机质的矿质化过程, 抑制了土壤有机质的分解(Hagedorn *et al.*, 2003), 导致林地地表凋落物分解对土壤有机质输入的速率大于有机质矿质化速率。

3.2 氮磷添加对不同种植密度大叶相思林土壤N、P和K含量的影响

本研究中, 大叶相思林在N、P添加后, 由于元素可利用性发生改变, 引起N、P循环过程发生改变, 再加上该林分是P受限, 从而导致土壤气态元素可能发生改变, 林分生产力发生变化, 进而影响土壤养分变化。施N和N+P显著增加了大叶相思林的土壤全N含量, 与赵阳等(2013)和李琛琛等(2014)的研究结果一致。这是因为外源性N直接增加土壤全N和碱解N的含量, 但是增加的N可能与其他物质聚合, 形成难于分解的复合物(Coûteaux *et al.*, 1995), 有助于提高土壤全N含量。N和N+P处理均显著提高了林地土壤的碱解N含量, 原因是N沉降直接增加了土壤中的有效N(胡艳玲等, 2009; 陈智等, 2010)。施N+P处理的碱解N含量显著低于施N处理, 可能是因为N和P同时添加, 有利于土壤养分平衡, 增加了植物吸收N和土壤微生物对N的固定(Blanes *et al.*, 2012)。施P降低了4个密度林分的土壤全N含量, 可

表2 施肥处理和密度对大叶相思林土壤化学性质的交互作用

Table 2 Interaction between NP treatments and density in soil chemical properties of *Acacia auriculiformis* stands

指标 Parameter	NP处理 NP treatments		密度 Density		密度与NP处理交互作用 Interaction between density and NP treatments	
	F	p	F	p	F	p
pH	734.716	0.000	52.721	0.000	10.57	0.000
有机质 SOC	379.581	0.000	2 764.643	0.000	36.204	0.000
全氮 TN	81.08	0.000	680.233	0.000	6.732	0.000
全磷 TP	2 445.366	0.000	651.776	0.000	16.592	0.000
全钾 TK	4.887	0.007	189.284	0.000	8.448	0.000
碱解氮 AN	1 734.794	0.000	265.347	0.000	8.02	0.000
有效磷 AP	1 345.668	0.000	322.54	0.000	43.607	0.000
速效钾 AK	412.176	0.000	536.283	0.000	24.536	0.000

AK, available potassium; AN, alkalized nitrogen; AP, available phosphorus; SOC, organic matter; TK, total potassium; TP, total phosphorus; TN, total nitrogen.

能是P添加促进了土壤有机N的矿质化速率所致。施P对4个密度林分的土壤碱解N含量没有显著影响。P促进土壤有效N的吸收, 但是并没有显著降低土壤的有效N含量, 可能是因为大叶相思是固N树种, 土壤中的有效N通过其凋落物和根瘤得到补充。

施N显著降低了较高和高密度林分土壤的全P含量。这是因为N沉降可以提高土壤磷酸酶活性(Saiya-Cork *et al.*, 2002; 涂利华等, 2009; 李银等, 2011), 促进含P有机物的分解, 提高土壤的有效性P含量, 从而减少了全P含量。施P和N+P均显著提高了林分土壤的全P含量, 这是因为施N+P和P直接向土壤中输入了有效P, 过量的有效P保留在了土壤中, 使得土壤的全P含量显著高于对照。N和P同时添加, 养分均衡, 有利于植物根系和微生物对P的吸收, 因而比单独添加P的处理全P含量低。本研究中, 施N对不同密度林分的土壤有效P影响不一致。低密度和中密度林分施N后有效P含量下降, 较高密度林分下降显著, 这与袁颖红等(2007)研究N沉降对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林土壤有效养分的研究结果一致。一方面, 可能是因为施N后加快了林木生长, 吸收的土壤有效P增加而引起土壤有效P减少(Mellert *et al.*, 2008; Prietzel *et al.*, 2008); 另一方面, 施N后引起的土壤pH和有机P的矿质化速率的下降, 增加铁和铝氢氧化物对磷酸盐的吸附作用而降低了土壤有效P含量(Meiwes *et al.*, 2002; 张鼎华等, 2008)。高密度林分施N后有效P含量的显著增加, 可能是施N引起土壤酸化后, 磷酸酶活性增强, 促进迟效状态的P向可溶性磷转化(袁颖红等, 2007)。施P和N+P处理后有效P含量的显著增加, 是因为施P和N+P处理导致土壤外源性P含量大, 使过量的无机P储存在土壤中, 同时引起土壤生物在代谢过程中可产生各种酸性或碱性磷酸酶类, 从而使磷酸酯等有机磷酸盐水解转化为植物可以吸收和利用的可溶性P(盛荣等, 2010)。

除了中密度林分, N、P和N+P处理对其他密度大叶相思林的土壤全K含量影响不显著, 可能是因为K主要来自土壤的风化, 与土壤母质中的K含量密切相关, 以致2年的试验期间未能对土壤全K含量产生显著影响。N和N+P处理显著降低了林分土壤的速效K含量, 这与樊后保等(2008)和袁颖红等(2007)的研究结果一致。原因可能是土壤达到N饱和时, 由于NO₃⁻的淋溶, 作为NO₃⁻的电荷平衡离子的

K⁺也从土壤中淋失(Nakaji *et al.*, 2002)。施P显著增加了大叶相思林的土壤速效K含量或无显著影响。这是因为P添加提高了土壤微生物的活性, 在其分解释放有机酸的过程中, 有助于土壤中矿物态K转化成有效K(张鸿龄等, 2007)。

3.3 氮磷添加和密度对大叶相思林土壤化学性质的交互作用

本研究结果表明, 各处理随着林分密度的增加, 土壤有机质、全N、碱解N、全P、有效P和速效K含量呈现上升趋势。这是因为林分密度的提高导致林分凋落物量增加, 有机质含量也较高。同时, 林分密度的提高促使了单位面积的根系密集度高且覆盖土壤范围大, 而根系分泌物中的糖类和氨基酸及维生素等可以为植物根际微生物提供充足的养分, 增加了根际微生物数量和活性, 促进酶活性, 从而提高土壤有效养分含量(王华等, 2013)。一些研究发现中等密度的人工林土壤养分含量高(冯宜明等, 2018; 孙千惠等, 2018; 王媚臻等, 2019; 赵伟文等, 2019), 而本研究结果显示高密度林分土壤养分含量高, 原因可能是大叶相思有根瘤菌固氮, 叶片的养分含量高, 高密度林分郁闭早, 有大量的凋落物回归林地, 且分解速度快(Feng *et al.*, 2018), 有利于林地肥力的增加。

总体来看, 氮磷添加降低土壤pH、全K和速效K含量, 增加了土壤有机质、全N、碱解N、全P和有效P含量, 林分密度降低或增加了土壤pH, 增加了土壤有机质和N、P、K含量。由于氮磷添加对全K和速效K的作用(*F*值)小于林分密度, 所以二者的交互作用以林分密度的影响为主, 故二者的交互作用增加了土壤全K和速效K含量; 氮磷添加和密度均增加了林分土壤的有机质、N和P含量, 因此, 二者的交互作用显著增加了林分土壤的有机质、全N、碱解N、全P和有效P含量。

综合分析表明, 在华南地区不同密度的大叶相思林2年添加N和P显著改变了土壤的化学性质。N处理显著提高了林分土壤的全N和碱解N含量, 显著降低了土壤的pH和速效K含量; P处理显著提高了土壤有机质、全P和有效P含量; N+P处理显著提高了林地土壤的有机质、碱解N、全P和有效P含量, 显著降低了土壤的pH和速效K含量。随着林分密度的增加, 各处理的土壤有机质、全N、碱解N、全P、有效P和速效K含量显著提高。氮磷处理和密度的交

互作用对大叶相思林的土壤pH、有机质和N、P、K含量有显著影响。

长期的N沉降和施P肥直接影响了土壤肥力,而林分密度通过影响林地环境和土壤微生物特性而改变森林土壤养分状况。在全球N沉降化和P肥广泛应用的背景下,研究土壤化学性质对氮磷添加和林分密度的响应过程和机制,对于我国亚热带森林的养分管理具有重要意义。目前的研究多集中于氮磷添加或林分密度对土壤肥力的影响,几乎没有涉及其交互作用影响土壤的报道,因此,氮磷添加和林分密度交互作用对土壤的影响还有待更广泛、更深入地研究。

参考文献

- Azad S, Manik MR, Hasan SM, Matin A (2011). Effect of different pre-sowing treatments on seed germination percentage and growth performance of *Acacia auriculiformis*. *Journal of Forestry Research*, 22, 183–188.
- Blanes MC, Emmett BA, Viñeola B, Carreira JA (2012). Allelivation of P limitation makes tree roots competitive for N against microbes in a N-saturated conifer forest: A test through P fertilization and ¹⁵N labelling. *Soil Biology & Biochemistry*, 48, 51–59.
- Boxman AW, Peters RCJH, Roelofs JGM (2008). Long term changes in atmospheric N and S throughfall deposition and effects on soil solution chemistry in a Scots pine forest in the Netherlands. *Environmental Pollution*, 156, 1252–1259.
- Chen H, Gurmessa GA, Zhang W, Zhu XM, Zheng MH, Mao QG, Zhang T, Mo JM (2016). Nitrogen saturation in humid tropical forests after 6 years of nitrogen and phosphorus addition: Hypothesis testing. *Functional Ecology*, 30, 305–313.
- Chen Z, Yin HJ, Wei YY, Liu Q (2010). Short-term effects of night warming and nitrogen addition on soil available nitrogen and microbial properties in subalpine coniferous forest, Western Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 1254–1264. [陈智, 尹华军, 卫云燕, 刘庆 (2010). 夜间增温和施氮对川西亚高山针叶林土壤有效氮和微生物特性的短期影响. 植物生态学报, 34, 1254–1264.]
- Coûteaux MM, Bottner P, Berg B (1995). Litter decomposition, climate and litter quality. *Trends in Ecology & Evolution*, 10, 63–66.
- Dong W, Liu TR, Qin ZJ, Guo JP, Zhang YX (2019). Research on the characteristics of soil physicochemical properties and microbial biomass carbon and nitrogen in natural *Pinus tabulaeformis* forests with different stand densities. *Ecology and Environmental Sciences*, 28, 65–72. [董威, 刘泰瑞, 覃志杰, 郭晋平, 张芸香 (2019). 不同林分密度油松天然林土壤理化性质及微生物量碳氮特征研究. 生态环境学报, 28, 65–72.]
- Ellis RH, Mai-Hong T, Hong TD, Tan TT, Xuan-Chuong ND, Hung LQ, Ngoc-Tam B, Le-Tam VT (2007). Comparative analysis by protocol and key of seed storage behaviour of sixty Vietnamese tree species. *Seed Science and Technology*, 35, 460–476.
- Fan HB, Liu WF, Yang YL, Zhang ZW, Cao HY, Xu L (2008). Decomposition of leaf litter of Chinese fir in response to increased nitrogen deposition. *Journal of Beijing Forestry University*, 30(2), 8–13. [樊后保, 刘文飞, 杨跃霖, 张子文, 曹汉洋, 徐雷 (2008). 杉木人工林凋落物分解对氮沉降增加的响应. 北京林业大学学报, 30(2), 8–13.]
- Fang H, Mo JM, Peng SL, Li ZA, Wang H (2007). Cumulative effects of nitrogen additions on litter decomposition in three tropical forests in southern China. *Plant and Soil*, 297, 233–242.
- Fang YT, Gundersen P, Mo JM, Zhu WX (2008). Input and output of dissolved organic and inorganic nitrogen in subtropical forests of South China under high air pollution. *Biogeosciences*, 5, 339–352.
- Feng HF, Xue L (2019). Competition-density effect of tree organs in *Acacia auriculiformis* stands. *Journal of Forestry Research*, 30, 891–898.
- Feng HF, Xue L, Chen HY (2018). Responses of decomposition of green leaves and leaf litter to stand density, N and P additions in *Acacia auriculiformis* stands. *European Journal of Forest Research*, 137, 819–830.
- Feng YM, Li Y, Cao XW, Liu JQ, Qi R, Zhao Y, Chen XL (2018). Characteristics of stand structure and soil physicochemical properties of artificial young *Picea asperata* plantation with different densities in southern Gansu. *Scientia Silvae Sinicae*, 54(10), 20–30. [冯宜明, 李毅, 曹秀文, 刘锦乾, 齐瑞, 赵阳, 陈学龙 (2018). 甘肃南部不同密度云杉人工幼林的林分结构特征及土壤理化性质. 林业科学, 54(10), 20–30.]
- Gundersen P, Sevel L, Christiansen JR, Vesterdal L, Hansen K, Bastrup-Birk A (2009). Do indicators of nitrogen retention and leaching differ between coniferous and broadleaved forests in Denmark? *Forest Ecology and Management*, 258, 1137–1146.
- Hagedorn F, Spinnler D, Siegwolf R (2003). Increased N deposition retards mineralization of old soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 35, 1683–1692.
- Hu YL, Han SJ, Li XF, Zhao YT, Li D (2009). Responses of soil available nitrogen of natural forest and secondary forest to simulated N deposition in Changbai Mountain. *Journal of Northeast Forestry University*, 37(5), 36–38, 42. [胡艳玲, 韩士杰, 李雪峰, 赵玉涛, 李东 (2009). 长白山原始林和次生林土壤有效氮含量对模拟氮沉降的响应. 东北林业大学学报, 37(5), 36–38, 42.]
- Kumar R, Pandey KK, Chandrashekar N, Mohan S (2011).

- Study of age and height wise variability on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus hybrid*, *Acacia auriculaeformis* and *Casuarina equisetifolia*. *Biomass and Bioenergy*, 35, 1339–1344.
- Li CC, Liu N, Guo JP, Zhang YX, Yang SH, Bai JH (2014). Short term effect of nitrogen deposition on needle of *Larix* and forest soil. *Ecology and Environmental Sciences*, 23, 1924–1932. [李琛琛, 刘宁, 郭晋平, 张芸香, 杨三红, 白晋华 (2014). 氮沉降对华北落叶松叶特性和林下土壤特性的短期影响. *生态环境学报*, 23, 1924–1932.]
- Li J, Xue L (2017). Research progress in the effect of nitrogen and phosphorus deposition on biochemical characteristics of forest soil. *World Forestry Research*, 30(2), 14–19. [李洁, 薛立 (2017). 氮磷沉降对森林土壤生化特性影响研究进展. *世界林业研究*, 30(2), 14–19.]
- Li Y, Zeng SC, Huang WJ (2011). Effects of simulated nitrogen deposition on soil acid phosphomonoesterase activity and soil available phosphorus content in subtropical forests in Dinghushan Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22, 631–636. [李银, 曾曙才, 黄文娟 (2011). 模拟氮沉降对鼎湖山森林土壤酸性磷酸单酯酶活性和有效磷含量的影响. *应用生态学报*, 22, 631–636.]
- Liang LL, Xue L, Fu JD, Zheng WG, Shi XL, Feng HF (2009). Density effects on interactions between above and below-ground competition in young *Acacia auriculaeformis* stands. *Journal of South China Agricultural University*, 30(3), 59–62. [梁丽丽, 薛立, 傅静丹, 郑卫国, 史小玲, 冯慧芳 (2009). 密度对大叶相思幼林地上竞争和地下竞争的影响. *华南农业大学学报*, 30(3), 59–62.]
- Lie ZY, Wang ZM, Xue L (2016). Effect of density of *Tephrosia candida* stands on soil characteristics. *Legume Research*, 40, 551–555.
- Lieb AM, Darrouzet-Nardi A, Bowman WD (2011). Nitrogen deposition decreases acid buffering capacity of alpine soils in the southern Rocky Mountains. *Geoderma*, 164, 220–224.
- Lin WQ, Cai JH, Xue L (2019). Short-term interactive effects of nitrogen and phosphorus additions and different planting densities on soil chemical properties of *Cinnamomum camphora* seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 9162–9170. [林婉奇, 蔡金桓, 薛立 (2019). 氮磷添加与不同栽植密度交互对樟树幼苗土壤化学性质的短期影响. *生态学报*, 39, 9162–9170.]
- Liu JX, Fang X, Deng Q, Han TF, Huang WJ, Li YY (2015). CO₂ enrichment and N addition increase nutrient loss from decomposing leaf litter in subtropical model forest ecosystems. *Scientific Reports*, 5, 7952. DOI: 10.1038/srep07952.
- Lu RK (2000). *Methods of Soil Agricultural Chemical Analysis*. China Agricultural Science and Technology Press, Beijing. [鲁如坤 (2000). 土壤农业化学分析方法. 中国农业科技出版社, 北京.]
- Lu XK, Mo JM, Gundersem P, Zhu WX, Zhou GY, Li DJ, Zhang X (2009). Effect of simulated N deposition on soil exchangeable cations in three forest types of subtropical China. *Pedosphere*, 19, 189–198.
- Meiwes KJ, Meesenburg H, Bartens H, Khanna PK (2002). Accumulation of humus in the litter layer of forest stands at Solling: Possible causes and significance for the nutrient cycling. *Forst Holz*, 57, 428–433.
- Mellert KH, Prietzel J, Straussberger R, Rehfuess KE, Kahle HP, Perez P, Spiecker H (2008). Relationships between long-term trends of air temperature, precipitation, nitrogen nutrition and growth of coniferous stands in Central Europe and Finland. *European Journal of Forest Research*, 127, 507–524.
- Nakaji T, Takenaga S, Kuroha M, Izuta T (2002). Photosynthetic response of *Pinus densiflora* seedlings to high nitrogen load. *Environmental Sciences*, 9, 269–282.
- Prietzel J, Rehfuess KE, Stetter U, Pretzsch H (2008). Changes of soil chemistry, stand nutrition, and stand growth at two Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sites in Central Europe during 40 years after fertilization, liming, and lupine introduction. *European Journal of Forest Research*, 127, 43–61.
- Saiya-Cork KR, Sinsabaugh RL, Zak DR (2002). The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 34, 1309–1315.
- She HJ, Cai JH, Xue L, Zheng XY (2018). Effects of nitrogen and phosphorus additions on leaf litter decomposition and soil biochemical characteristics in an *Acacia mangium* plantation. *Forest Research*, 31(2), 107–113. [余汉基, 蔡金桓, 薛立, 郑欣颖 (2018). 模拟外源性氮磷对马占相思凋落叶分解及土壤生化特性的影响. *林业科学研究*, 31(2), 107–113.]
- Sheng R, Xiao HA, Tan ZJ, Ding LJ, Xie DP (2010). Advance in phosphorus-dissolving microorganisms and the mechanisms on phosphorus transformation and availability. *Chinese Journal of Soil Science*, 41, 1505–1510. [盛荣, 肖和艾, 谭周进, 丁龙君, 谢达平 (2010). 土壤解磷微生物及其磷素有效性转化机理研究进展. *土壤通报*, 41, 1505–1510.]
- Srivastava NK, Ram LC, Mastro RE (2014). Reclamation of overburden and lowland in coal mining area with fly ash and selective plantation: A sustainable ecological approach. *Ecological Engineering*, 71, 479–489.
- Sun QH, Wu X, Wang MZ, Zhang LH, Yao XL, Qi JQ, Hao JF (2018). Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of *Pinus massoniana* plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 29, 732–738. [孙千惠, 吴霞, 王媚臻, 张柳桦, 姚小兰, 齐锦秋, 郝建锋 (2018). 林分密度对马尾松林林下物种多样性和土壤理化性质的影响. *应用生态学报*, 29, 732–738.]
- Tang GY, Gao CJ, Li K (2015). Effects of vegetation restoration

- on the amelioration of degraded soil in a dry-hot valley. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 5157–5167. [唐国勇, 高成杰, 李昆 (2015). 植被恢复对干热河谷退化土壤改良的影响. *生态学报*, 35, 5157–5167.]
- Tu LH, Hu TX, Zhang J, Li RH, Dai HZ, Luo SH, Xiang YB, Huang LH (2009). Soil enzyme activities in a *Pleiblastus amurus* plantation in Rainy Area of West China under simulated nitrogen deposition. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20, 2943–2948. [涂利华, 胡庭兴, 张健, 李仁洪, 戴洪忠, 雒守华, 向元彬, 黄立华 (2009). 华西雨屏区苦竹林土壤酶活性对模拟氮沉降的响应. *应用生态学报*, 20, 2943–2948.]
- Vitousek PM, Porder S, Houlton BZ, Chadwick OA (2010). Terrestrial phosphorus limitation: Mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecological Applications*, 20, 5–15.
- Wang H, Wang H, Zhao QY, Zhuang HF, Song YH, Zhu ZH (2013). Influence of different planting spacing of *Areca* nut intercropping with *Vanilla* on soil microbes and nutrients. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 19, 988–994. [王华, 王辉, 赵青云, 庄辉发, 宋应辉, 朱自慧 (2013). 槟榔不同株行距间作香草兰对土壤养分和微生物的影响. *植物营养与肥料学报*, 19, 988–994.]
- Wang MZ, Bi HJ, Jin S, Liu J, Liu YH, Wang Y, Qi JQ, Hao JF (2019). Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of a *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 981–988. [王媚臻, 毕浩杰, 金锁, 刘佳, 刘宇航, 王宇, 齐锦秋, 郝建锋 (2019). 林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响. *生态学报*, 39, 981–988.]
- Wei RP, Xue L, Chen HY, Hu DH, Xie TF, Wang XE (2009). Effects of rare earth on seeds germination and seedlings growth of *Acacia angium* and *Acacia auriculiformis*. *Chinese Journal of Soil Science*, 40, 896–901. [韦如萍, 薛立, 陈红跃, 胡德活, 谢腾芳, 王相娥 (2009). 稀土对马占相思和大叶相思种子萌发和幼苗生长的影响. *土壤通报*, 40, 896–901.]
- Wei XH, Blanco JA, Jiang H, Kimmins JPH (2012). Effects of nitrogen deposition on carbon sequestration in Chinese fir forest ecosystems. *Science of the Total Environment*, 416, 351–361.
- Xu SK, Wang XE, Xie TF, Zeng F, Huang LM (2008). Soil fertility of young *Acacia auriculiformis* stands with different densities. *Journal of South China Agricultural University*, 29, 79–81. [许松葵, 王相娥, 谢腾芳, 曾锋, 黄丽铭 (2008). 不同密度大叶相思幼林的土壤肥力. *华南农业大学学报*, 29, 79–81.]
- Xu SK, Xue L, Chen HY, Huang YF, Liu CY (2006). Soil physical and chemical properties of model woodlands in Nansha, Guangzhou. *Chinese Journal of Soil Science*, 37, 36–40. [许松葵, 薛立, 陈红跃, 黄永芳, 刘春燕 (2006). 广州南沙典型林地土壤理化性质的研究. *土壤通报*, 37, 36–40.]
- Yuan YH, Fan HB, Wang Q, Qiu XQ, Chen QF, Li YY, Huang YZ, Liao YC (2007). Available nutrients with increased N deposition in soils of *Cunninghamia lanceolata* plantations. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 24, 437–444. [袁颖红, 樊后保, 王强, 裘秀群, 陈秋凤, 李燕燕, 黄玉梓, 廖迎春 (2007). 模拟氮沉降对杉木人工林土壤有效养分的影响. *浙江林学院学报*, 24, 437–444.]
- Zhan N, Huang LJ (2016). Conditions for in vitro germination and testing method for pollen viability of *Acacia auriculiformis*. *Scientia Silvae Sinicae*, 52(2), 67–73. [詹妮, 黄烈健 (2016). 大叶相思花粉离体萌发适宜条件及活力检测方法. *林业科学*, 52(2), 67–73.]
- Zhang DH, Tu CJ, Shen PS, Liu GL (2008). Phosphorus status of main soil groups in Fujian mountainous regions. *Scientia Silvae Sinicae*, 44(8), 29–36. [张鼎华, 涂传进, 沈乒松, 刘桂林 (2008). 福建山地几种主要土类土壤磷的研究. *林业科学*, 44(8), 29–36.]
- Zhang HL, Liang CH, Sun TH (2007). Effects of long-term localized fertilization on soil potassium supply in a sheltered vegetable field. *Chinese Journal of Ecology*, 26, 1339–1343. [张鸿龄, 梁成华, 孙铁珩 (2007). 长期定位施肥对保护地土壤供钾特性的影响. *生态学杂志*, 26, 1339–1343.]
- Zhao WW, Liang WJ, Wei X (2019). Soil nutrient characteristics of *Larix principis rupprechtii* plantations with different stand densities. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 44, 84–92. [赵伟文, 梁文俊, 魏曦 (2019). 不同林分密度华北落叶松人工林土壤养分特征. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 44, 84–92.]
- Zhao Y, Zhang C, Zhao HF, Xu XN (2013). Effects of N and P addition on soil nitrogen mineralization in a subtropical evergreen broadleaved forest. *Chinese Journal of Ecology*, 32, 1690–1697. [赵阳, 张驰, 赵竑绯, 徐小牛 (2013). 氮磷添加对亚热带常绿阔叶林土壤氮素矿化的影响. *生态学杂志*, 32, 1690–1697.]
- Zhou DY, Bu DR, Ge ZW, Yan J, Xiao HR, Ruan HH, Cao GH (2015). Effects of nitrogen addition on soil fauna in poplar plantation with different ages in a coastal area of eastern China. *Chinese Journal of Ecology*, 34, 2553–2560. [周丹燕, 卜丹蓉, 葛之葳, 严靖, 肖晗冉, 阮宏华, 曹国华 (2015). 氮添加对沿海不同林龄杨树人工林土壤动物群落的影响. *生态学杂志*, 34, 2553–2560.]

责任编辑: 程磊 责任编辑: 李敏 实习编辑: 赵航