

DOI: 10.5846/stxb201910162163

冯慧芳, 余明, 薛立. 外源性氮磷添加及林分密度对大叶相思林土壤酶活性的影响. 生态学报, 2020, 40(14): 4894-4902.

Feng H F, Yu M, Xue L. Effects of nitrogen and phosphorus additions on soil enzyme activities in *Acacia auriculiformis* stands under different planting densities. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 4894-4902.

外源性氮磷添加及林分密度对大叶相思林土壤酶活性的影响

冯慧芳^{1,2}, 余明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:研究了林分密度和外源性氮(N)磷(P)添加及二者的交互作用对土壤酶活性的影响,可以为当前不同密度的亚热带林在氮沉降和施磷肥条件下,影响我国亚热带人工林土壤养分转化的酶学机制提供理论依据。以大叶相思(*Acacia auriculiformis*)人工林为试验材料,选择氯化铵(NH₄Cl)和二水合磷酸二氢钠(NaH₂PO₄·2H₂O)作为N肥和P肥,氮磷添加设置4个处理,即对照、施N、施P和施N+P;种植密度设置低密度(1667株/hm²)、中密度(2500株/hm²)、较高密度(4444株/hm²)和高密度(10000株/hm²)4个水平。在4种密度的大叶相思人工林下各设置一个样地(即4个样地),每个样地内5个样方,每个样方内设置4种处理,合计共16个处理,5个重复,80个小区,测定土壤脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性,分析林分密度和NP添加对大叶相思林地土壤酶活性的影响。研究表明:N添加对各林分密度下的土壤脲酶和过氧化氢酶活性均有抑制作用,P添加显著提高了过氧化氢酶活性和高密度林分大叶相思林地的土壤脲酶活性,却降低了低密度林分的土壤脲酶活性;土壤磷酸酶活性在P和N+P添加两种处理下显著小于对照和施N处理;土壤脲酶、磷酸酶以及对对照和P添加处理下的过氧化氢酶活性均随着林分密度的升高呈现上升趋势,而土壤过氧化氢酶活性在N和N+P添加后随着林分密度的减小而升高。林分密度和外源性NP添加的交互作用对三种土壤酶的活性均有显著影响。

关键词:NP添加;林分密度;土壤酶活性;大叶相思;交互作用

Effects of nitrogen and phosphorus additions on soil enzyme activities in *Acacia auriculiformis* stands under different planting densities

FENG Huifang^{1,2}, YU Ming¹, XUE Li^{1,*}

1 South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2 Forest Resources Conservation Center of Guangdong Province, Guangzhou 510173, China

Abstract: In this paper, the effects of planting density, N and P additions, and the both interaction on soil enzyme activity were studied in *Acacia auriculiformis* stands, which is helpful to provide theoretical basis for the enzyme mechanism affecting soil nutrient transformation under different planting densities, N deposition, and P fertilizer application background in subtropical forests. NH₄Cl and NaH₂PO₄·2H₂O were selected as N and P fertilizers, respectively. Four fertility treatments (control, N, P, and N+P) were used in four density *A. auriculiformis* stands (low density with 1667 trees/hm², medium density with 2500 trees/hm², relatively high density with 4444 trees/hm², and high density with 10000 trees/hm²). The four fertility treatments were used in 5 small plots of each density *A. auriculiformis* stand, which formed a total of 16 treatments with 5 repetitions for each treatment. The results showed that the soil urease activity and catalase activity

基金项目:中央财政林业科技推广示范项目(2015-GDTK-07)

收稿日期:2019-10-16; 网络出版日期:2020-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: forxue@scau.edu.cn

increased in the *A. auriculiformis* stands after N addition. P addition significantly increased the soil urease activity under high density stand, but reduced urease activity under low density stand compared to that of the control treatment. The activity of soil phosphoric enzyme under N and N+P treatments was significantly smaller than the control and N treatment. The soil urease and phosphoric enzyme activities increased with increasing forest density, while soil catalase activity increased with decreasing stand density under N and N+P treatments, but reduced under the control and P treatment. The interactive effects of different stand densities and N and P additions on the soil catalase, urease and phosphoric enzyme activities were significant in the *A. auriculiformis* stands.

Key Words: N and P additions; planting density; soil enzyme activity; *Acacia auriculiformis* stand; interaction

工业的发展、化石燃料燃烧和氮(N)肥的大量施用使大气 N 沉降日趋严重^[1],影响了全球 N 素循环和平衡。我国南方地区是高 N 沉降区域^[2],据报道,广东韶关地区大气 N 沉降量的平均值为 $3.72 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[3],2004 至 2005 年广东鼎湖山保护区的大气无机 N 和有机 N 输入分别达到 $3.2\text{—}3.4 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $1.8 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[4],华南地区的大气 N 沉降量约为 $4 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[5]。N 沉降的增加会导致土壤酸化和养分流失,还会引起森林生态系统的磷(P)限制^[6]。华南地区林地的土壤普遍缺 P 而广泛施用 P 肥^[7],P 肥的施加往往超过林木的实际需 P 量,而该地区的酸性土壤对 P 的吸附作用较强,外源性 P 添加会减弱土壤对 P 的吸附力^[6],影响土壤 P 的富集^[8-9]。

土壤酶活性与森林土壤养分特征、理化性质和微生物数量密切相关^[10],外源性 NP 添加会影响森林生态系统中的养分循环和土壤微生物群落^[4],从而对碳(C)、N、P 转换相关的土壤酶活性产生重要的影响^[11]。土壤脲酶与土壤动植物的氮获取有重要关系,能够将土壤有机氮向挥发态或向植物有效态转化^[12]。土壤磷酸酶能促进土壤中有机磷化合物水解,生成能被植物吸收利用的无机态磷,土壤磷酸酶活性的高低与土壤有效 P 水平密切相关。过氧化氢酶活性可反映土壤腐殖质化、有机质化的强度和速度^[13]。酶活性反映了土壤营养物和底物的可用性,可以用来评价氮沉降的效果^[14]。当前,已有较多学者研究了 N 沉降和 P 添加对森林土壤酶活性的影响。例如,朱仕明等^[8]研究了外源性 N 和 P 对黎蒴(*Castanopsis fissa*)林的土壤磷酸酶活性的影响。董喜光等^[9]发现,外源性 P 可以增加缺 P 的南方红壤的微生物数量和促进酶活性提高。

已有研究表明,土壤酶活性受林分密度的间接影响^[15],随着林分密度的增加,土壤养分含量和酶活性通常呈现减小或者先增后减的趋势^[16-18]。Lie 等^[19]对不同密度下山毛豆(*Tephrosia candida*)幼林的土壤养分含量和酶活性进行了研究,发现土壤养分含量以及土壤脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性均随着林分密度的增加而降低。董威等^[20]的研究指出,油松(*Pinus tabulaeformis*)林地土壤除全 P 外,其他养分含量均随密度增加呈先增后减的变化规律。尽管有学者报道了 NP 添加或林分密度影响森林土壤养分和酶活性^[21-23],NP 添加与不同栽植密度对樟树(*Cinnamomum camphora*)盆栽幼苗的土壤有机质、碱解 N 和速效钾含量^[24]有显著的交互作用,尚未见有关外源性 NP 与不同林分密度交互作用对土壤酶活性影响的报道。大叶相思(*Acacia auriculiformis*)属于含羞草科金合欢属的速生乔木树种,广泛用于华南地区的造林绿化。作者对大叶相思林土壤三种水解酶活性进行研究,探讨林分密度和外源性 NP 添加的交互作用对土壤酶活性的影响,以期对 N 沉降增加和 P 肥施用背景下的我国南方人工林土壤养分转化的酶学机理研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究地点位于惠州市惠城区小金口($114^{\circ}17'42''\text{—}114^{\circ}32'16''\text{E}$, $22^{\circ}56'57''\text{—}23^{\circ}16'03''\text{N}$),属南亚热带季风气候。年平均气温在 $19.5\text{—}22.1^{\circ}\text{C}$,7 月份平均气温 28.3°C ,1 月份平均气温 13.1°C ,极端最高气温 38.9°C ,极端最低气温 -1.9°C ,积温 7620.6°C ,无霜期 $350\text{—}357\text{d}$ 。年平均降雨量 $1690\text{—}2380 \text{ mm}$,多集中在 4—9 月,占年降雨量的 $80\%\text{—}85\%$ 。夏季多吹东南风,冬季多吹东北风,台风发生在 6—10 月。大叶相思林下主要植

被有玉叶金花 *Mussaenda pubescens*、桃金娘 *Rhodomyrtus tomentosa*、海金沙 *Lygodium japonicum*、芒草 *Miscanthus sinensis*、芒萁 *Dicranopteris pedata*、梅叶冬青 *Ilex asprella*、米碎花 *Eurya chinensis*、了哥王 *Wikstroemia indica*、野牡丹 *Melastoma candidum* 和黑面神 *Breynia fruticosa* 等。

1.2 试验设计

2003 年春季在惠州小金口的火烧迹地林地, 割除林地上的芒草、桃金娘等杂草和藤类后, 块状开穴(规格 50 cm×50 cm×40 cm), 按 1667(低密度)、2500(中密度)、4444(较高密度)、10000(高密度)株/hm²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 种植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) 的样地用于试验。2013 年 4 月在 4 种植密度的样地内分别设 5 个 5 m×5 m 的小样方(即 5 个重复), 每个小样方内设置 4 种面积为 1 m×1 m 的处理(对照、加 N、加 P、加 N+P), 各处理间设至少 3 m 的缓冲带。2013 年 4 月开始每隔三个月对小样方进行地表喷洒处理, 到 2015 年 3 月完成试验。林分在施肥试验前, 没有进行施肥除草等经营活动。这些地块位于彼此相距 30m 以内, 所处环境条件相似。2013 年林分特征和施肥处理前后的样地土壤化学性质分别见表 1 和表 2。

表 1 林分的基本特征

Table 1 Characteristics of the *Acacia auriculiformis* stands

林分 Stand	林龄 Age/a	郁闭度 Canopy density	密度 Density/ (株/hm ²)	胸径 Diameter at breast height/cm	树高 Tree height/m	坡向 Slope	坡度 Gradient
高密度 High density	10	0.80	10000	8.6	11.1	SW42°	27°
较高密度 Relatively high density	10	0.75	4444	9.8	10.1	SW44°	30°
中密度 Medium density	10	0.70	2500	10.6	10.2	SW44°	31°
低密度 Low density	10	0.65	1667	11.4	11.2	SW43°	28°

表 2 施肥处理前后的土壤 pH 值及养分状况(平均值±标准差)

Table 2 Soil pH and nutrient contents before and after fertility treatment (means ± SD)

处理 Treatment		指标 Parameter					
		pH	有机质 Organic matter/ (g/kg)	全氮 Total N/ (g/kg)	全磷 Total P/ (g/kg)	碱解氮 Alkalized N/ (mg/kg)	有效磷 Available P/ (mg/kg)
高密度 High density	CK	4.12±0.09	35.66 ±0.45	1.72 ±0.02	0.30 ±0.00	98.32±4.30	2.00±0.25
	N	3.48±0.12	36.97 ±0.86	1.98 ±0.10	0.29 ±0.00	216.13±5.50	4.82±0.54
	P	4.28±0.10	40.19 ±0.60	1.59 ±0.03	0.54 ±0.02	102.89±8.30	11.05±0.51
	N+P	3.22±0.07	45.36 ±0.26	1.74 ±0.02	0.42 ±0.00	143.87±4.70	7.49±0.37
较高密度 Relatively high density	CK	4.12±0.07	30.02 ±0.38	1.56 ±0.03	0.22 ±0.02	87.56±1.74	1.92±0.10
	N	3.35±0.04	31.47 ±0.50	1.65 ±0.04	0.25 ±0.00	207.09±5.45	1.05±0.05
	P	4.14±0.04	34.46 ±0.24	1.47 ±0.07	0.53 ±0.00	86.92±1.51	8.52±0.21
	N+P	3.45±0.05	34.36 ±0.25	1.53 ±0.02	0.41 ±0.00	120.88±6.02	5.94±0.19
中密度 Medium density	CK	4.08±0.02	28.68 ±0.27	1.27 ±0.02	0.23 ±0.01	80.15±1.19	1.87±0.10
	N	3.45±0.05	28.62 ±0.22	1.44 ±0.02	0.20 ±0.00	180.33±5.71	1.73±0.10
	P	4.53±0.04	31.65 ±0.25	1.21 ±0.03	0.48 ±0.00	82.43±1.19	7.40±0.52
	N+P	3.32±0.05	33.45 ±0.74	1.43 ±0.04	0.36 ±0.00	119.15±4.82	5.31±0.02
低密度 Low density	CK	4.26±0.04	22.70 ±0.25	1.04 ±0.03	0.16 ±0.00	53.32±5.00	1.48±0.03
	N	3.66±0.04	22.56 ±0.37	1.11 ±0.02	0.14 ±0.00	155.94±3.43	1.27±0.03
	P	4.56±0.04	24.53 ±0.38	0.91 ±0.04	0.36 ±0.01	53.85±2.15	5.70±0.32
	N+P	3.69±0.05	24.66 ±0.21	1.13 ±0.02	0.28 ±0.01	106.22±5.70	2.82±0.14

我国华南地区氮沉降量约为 4 g m⁻² a⁻¹[5], 由于未来的 N 沉降持续增加, 本研究的 N 和 P 添加量根据样

地的氮沉降水平背景值以及参考同类研究方法^[13,25],N 肥选用氯化铵(NH_4Cl),P 肥选用二水合磷酸二氢钠($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),样方内 N、P 和 N+P 的添加量分别为 NH_4Cl $10 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $5 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, NH_4Cl $10 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ + $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $5 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,将各处理所需的肥料溶解至 1 L 的水,用喷雾器均匀喷洒在土壤表面,对照(CK)则喷洒相同体积的水。

1.3 土样采集和测定指标及方法

2015 年 4 月,试验结束时将 4 个密度林分的 5 个样方的 CK、加 N、加 P 和加 N+P 处理用直径 2 cm、深 10 cm 的取土钻采用五点取样法取 0—10 cm 土壤,共 80 个土壤样品带回实验室用于土壤酶活性的测定。脲酶采用比色法测定,酶活性以 37℃ 下培养 24 h 后 1 kg 土释放的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的毫克数表示;酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,酶活性以 37℃ 下培养 2 h 后 100 g 土消耗五氧化二磷的毫克数表示;过氧化氢酶活性采用 0.1 mol/L 高锰酸钾滴定法测定,酶活性以常温条件培养 1 h 后 1 g 土消耗 0.1 mol/L KMnO_4 的毫升数表示^[26]。

1.4 数据统计方法

用微软公司的 Microsoft Excel 2003 对土壤酶数据作图, SAS 9.3 统计分析软件对各处理的酶活性进行方差分析,然后对有显著差异的数据进行 Duncan 多重检验, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 大叶相思林地的土壤脲酶活性

各密度大叶相思林施 N 和 P 后土壤的脲酶活性范围为 152—763 $\text{mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (图 1)。随着林分密度的减小,各处理的土壤脲酶活性均呈现下降的趋势。与 CK 相比,N 处理的高、较高、中和低密度林分的土壤脲酶活性分别减少了 32%、31%、43% 和 56%,N+P 处理的各密度林分分别减少了 21%、53%、50% 和 56%,P 处理的高密度和较高密度林分分别增加了 15% 和 3%,中密度和低密度林分分别减少了 3% 和 23%。各密度林分施 N 和 N+P 两种处理的脲酶活性均显著小于 CK($P < 0.05$)。施 P 后,低密度林分的土壤脲酶活性显著低于 CK,高密度林分显著高于 CK($P < 0.05$),其他密度林分与 CK 无显著差异。

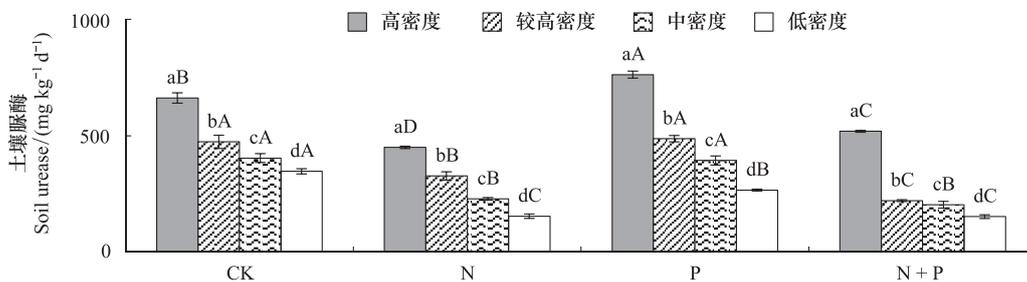


图 1 不同密度和 NP 处理下大叶相思林的土壤脲酶活性

Fig.1 Soil urease activity of the *Acacia auriculiformis* stands under different densities and N and P treatments

不同小写字母表示相同氮磷添加处理下的不同种植密度间差异显著,不同大写字母表示相同种植密度下的不同氮磷添加处理间差异显著, $P < 0.05$

2.2 大叶相思林地的土壤磷酸酶活性

各密度大叶相思林施 N 和 P 后的土壤磷酸酶活性范围为 421—1197 $\text{mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (图 2)。随着林分密度的减小,土壤磷酸酶活性均呈现下降的趋势。与 CK 相比,N、P 和 N+P 处理的高密度林分的土壤磷酸酶活性分别增加了 1% 和减少了 16%、9%,较高密度林分分别增加了 6% 和减少了 42%、42%,中密度林分分别减少了 6%、28% 和 30%,低密度林分分别增加了 10% 和减少了 32%、19%。在同一密度下,施 P 和 N+P 两种处理的磷酸酶活性均显著小于 CK($P < 0.05$),施 N 处理对不同林分密度的土壤磷酸酶活性影响存在差异,但没有表

现出明显规律。

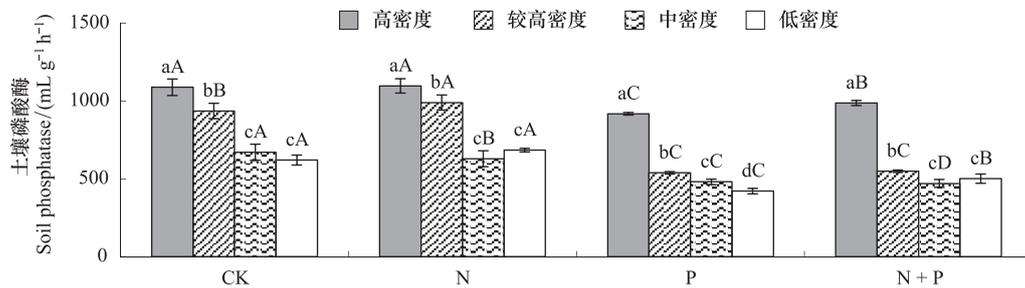


图2 不同密度和 NP 处理下大叶相思林的土壤磷酸酶活性

Fig.2 Soil phosphoric enzyme activity of the *Acacia auriculiformis* stands under different densities and N and P treatments

不同小写字母表示相同氮磷添加处理下的不同种植密度间差异显著,不同大写字母表示相同种植密度下的不同氮磷添加处理间差异显著, $P < 0.05$

2.3 大叶相思林地的土壤过氧化氢酶活性

各密度大叶相思林施 N 和 P 后的土壤过氧化氢酶活性范围为 $0.73\text{--}2.37\text{ ml g}^{-1}\text{ h}^{-1}$ (图 3)。施 N 和 N+P 处理的土壤过氧化氢酶活性随着林分密度的减小而升高,CK 和施 P 处理则有降低的趋势。与 CK 相比,N 和 N+P 处理的高密度林分的土壤过氧化氢酶活性分别减少了 60% 和 64%,较高密度林分分别减少了 49% 和 47%,中密度林分分别减少了 23% 和 31%,低密度林分分别减少了 14% 和 16%;P 处理的高、较高、中和低林分密度的过氧化氢酶活性分别增加了 15%、9%、11% 和 14%。各个密度林分施 N 和 N+P 后,土壤的过氧化氢酶活性均显著低于 CK,施 P 处理均显著高于 CK ($P < 0.05$)。

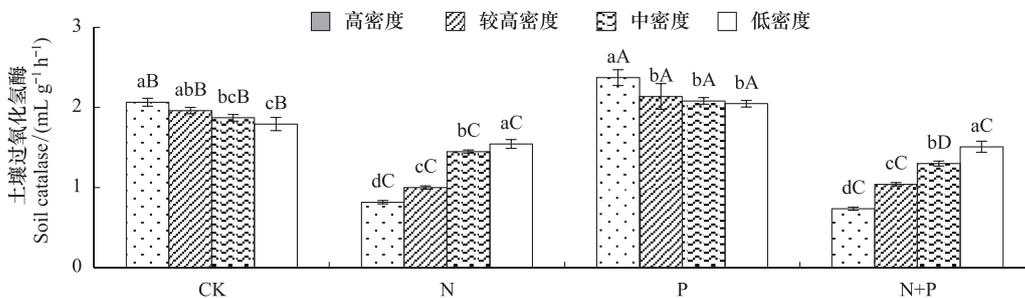


图3 不同密度和 NP 处理下大叶相思林的土壤过氧化氢酶活性

Fig.3 Soil catalase activity of the *Acacia auriculiformis* stands under different densities and N and P treatments

不同小写字母表示相同氮磷添加处理下的不同种植密度间差异显著,不同大写字母表示相同种植密度下的不同氮磷添加处理间差异显著, $P < 0.05$

2.4 NP 添加和林分密度的交互作用对土壤酶活性的影响

大叶相思林地的三种酶活性在各林分密度间和不同 NP 添加处理间均有显著性差异。林分密度对脲酶、磷酸酶以及 CK 和施 P 处理的过氧化氢酶活性具有显著正效应,对施 N 和 N+P 处理的过氧化氢酶则具有负效应,且对土壤脲酶活性的作用较强,而 NP 添加处理对土壤过氧化氢酶活性的影响较大。林分密度和 NP 添加处理的交互作用对大叶相思林地的三种酶活性均有显著影响(表 3)。

3 讨论

3.1 NP 添加和林分密度对土壤脲酶活性的影响

有研究指出,外源性 N 添加能够增大土壤脲酶的活性^[27]。如涂利华等^[28]对华西雨屏区光皮桦(*Betula*

luminifera) 人工林的土壤酶活性的研究中发现, N 添加处理下的脲酶活性比对照增加了 11.3%—44.9%。另一些研究则报道了 N 添加对脲酶活性有抑制作用^[29]。本研究结果显示, 各林分密度下施 N 和 N+P 处理的土壤脲酶活性均低于对照。首先, 使用 NH_4Cl 作为 N 肥增加了土壤中的氨根离子浓度, 提高了土壤中的 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 等金属阳离子的活性, 对土壤微生物群落造成一定的毒害作用^[30]。其次, 本研究中各林分密度下 N 添加处理的土壤碱解氮含量均明显高于对照和其他处理 ($P < 0.05$, 表 2), 这增加了土壤 N 元素的可利用性, 缓解了土壤中的 N 限制, 导致土壤微生物群落对土壤脲酶的分泌减少, 其活性也随之降低^[13]。最后, 本研究中的施 N 处理通常显著降低了土壤 pH 值 ($P < 0.05$, 表 2), 增强了土壤酸性而抑制了脲酶活性。

表 3 氮磷添加和林分密度对土壤酶活性的交互作用

Table 3 Interaction between density and N and P additions in soil enzyme activity

指标 Parameter	密度 Density		NP 添加 N and P additions		密度与处理交互作用 Interaction between density and NP additions	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
脲酶 Urease enzyme	1424.962	<0.001	703.976	<0.001	30.280	<0.001
磷酸酶 Phosphoric enzyme	490.592	<0.001	185.764	<0.001	15.597	<0.001
过氧化氢酶 Catalase enzyme	36.530	<0.001	807.406	<0.001	57.489	<0.001

施 P 显著提高了高密度林分的土壤脲酶活性, 却降低了低密度林分的土壤脲酶活性。原因是外源性 P 添加显著提高了土壤全 P 和有效 P 含量 ($P < 0.05$, 表 2), 缓解了高密度林分土壤 P 限制, 提高了微生物数量和活性。与此同时, P 添加促进了林木的生长发育, 因而对土壤 N 的吸收增加, 引起土壤全 N 下降, 微生物和植物根系会分泌更多的脲酶来增加对土壤 N 的获取^[6]。对于低密度林分而言, P 添加处理的土壤全 P 和有效 P 含量均低于其他林分密度 (表 2), 因为较大的 P 添加量减弱了南地区的酸性红壤对 P 的吸附力, 土壤中过量的 P 与 Fe、Al 或 Ca 等离子结合而降低了 P 的利用效率^[9]。外源性 NP 添加对森林土壤脲酶活性的作用效果不同, 可能是不同生态系统的土壤理化性质、养分状况、森林类型和微生物群落结构差异所导致的^[31]。

3.2 NP 添加和林分密度对土壤磷酸酶活性的影响

本研究中 P 和 N+P 添加两种处理下, 各林分密度土壤磷酸酶活性均显著小于对照 ($P < 0.05$)。已有较多研究指出 P 添加对土壤磷酸酶活性有抑制作用, 如郑棉海等^[32]在广东鼎湖山自然保护区森林的研究中指出 P 添加能够显著降低混交林和马尾松林的土壤磷酸酶活性。P 添加缓解了林地土壤的 P 限制, 降低了植物和土壤微生物对 P 的竞争^[33], 土壤微生物减少了以获取 P 为目的去合成磷酸酶的能量投入^[34]。因此, P 添加使土壤微生物和植物根系减少了磷酸酶的分泌量^[35]。与此同时, 动植物在土壤 P 充足时对其他养分的需求也相应增加, 微生物和植物增加了对获取 C、N 等其他重要养分的投资, 相关的胞外酶活性随之升高, 而磷酸酶活性则降低^[36]。此外, C 和 N 是合成磷酸酶蛋白的重要原材料^[37], P 添加还可能导致土壤可利用性 C 和 N 的供应量不足, 土壤中异养微生物的生长和磷酸酶活性随之受到限制^[10]。

本研究中 N 添加处理对大叶相思林地土壤磷酸酶活性的影响较小, 且没有明显规律。一方面, N 添加处理增加了土壤全 N 和碱解 N 含量, 而降低了较高密度、中密度和低密度林分的土壤有效 P 含量 (表 2), 这促进了树木的蓬勃生长和对土壤养分的吸收利用, 加剧了土壤 P 的缺乏。当土壤 P 含量偏低时, 土壤微生物或植物会通过调整生物量分配和生理生化反应等方式继续获取土壤中的有效 P, 而土壤 P 的缺乏也将促进微生物或者植物释放出更多的磷酸酶来增加 P 的可利用性^[32]。N 是构成磷酸酶蛋白的重要元素, N 添加有利于磷酸酶的合成^[38]。另一方面, N 添加造成的土壤酸化不利于土壤微生物繁衍, 过量的 N 会对植物和土壤微生物有毒害作用^[39], 会改变微生物的群落结构而影响土壤酶的分泌^[35]。此外, 本研究的 N 添加处理造成了土壤 pH 降低, 这对土壤酸、碱性磷酸酶的活性有重要影响^[40]。以上原因均导致了大叶相思林地土壤磷酸酶活性的波动性变化。

3.3 NP 添加和林分密度对土壤过氧化氢酶活性的影响

有的研究表明, N 添加对不同植物群落土壤过氧化氢酶活性的影响存在差异。如刘星等^[10]的研究指出,

模拟 N 沉降对山西太岳山油松林的土壤过氧化氢酶活性有抑制作用。Lv 等^[41]则发现了 N 添加显著提高了土壤过氧化氢酶的活性。本研究结果显示 N 和 N+P 添加能够抑制土壤过氧化氢酶活性并且降低土壤 pH, 而 P 添加则对土壤过氧化氢酶活性有促进作用。土壤酸化抑制了植物根系的活性和土壤碳的有效性, 外源性 N 与土壤中的 C 缩合, 导致微生物难以利用 C 源, 不利于相关微生物的发育, 还可能减少微生物群落的多样性而改变微生物群落的结构^[30]。另外, 有研究表明, 外源性 N 添加会减少土壤动物数量和真菌的相对丰度, 而过氧化氢酶大都由真菌分泌^[37]。Blackwood 等^[42]研究了 N 添加分子层面的作用机理, 指出 N 添加使得土壤中无机氮富集, 抑制了包括过氧化氢酶在内土壤氧化酶的基因表达。而研究所在地的土壤 P 含量较低, P 添加通过平衡土壤养分促进了植物生长发育和微生物生命活动, 提高了过氧化氢酶的活性。

3.4 林分密度及密度与 NP 添加的交互作用对土壤酶活性的影响

土壤脲酶、磷酸酶以及对对照和 P 添加处理下的过氧化氢酶活性均随着林分密度的升高而增大, 过氧化氢酶活性在 N 和 N+P 添加处理下随着林分密度的减小而升高。因为林木个体间的竞争情况随着种植密度的增加而愈加激烈, 高密度林分的蓬勃生长吸收了更多的土壤营养物质, 从而导致了土壤养分的可获得性降低^[43], 促进了土壤微生物和植物释放更多的胞外酶来获得限制养分。此外, 高密度林分的根系生物量^[44]和凋落物量较大, 而 Kang 等^[45]的研究发现, 养分失衡和较高的年凋落物量可能是导致林地土壤有较高酶活性的原因。因为大量的凋落物和根系死物提供给土壤丰富的有机质和分解底物, 增加了微生物对土壤胞外酶的分泌。

本研究中, 三种土壤酶活性在各林分密度间和不同 NP 添加处理间均有显著性差异。林分密度对土壤脲酶和酸性磷酸酶的作用大于 NP 添加, 所以二者的交互作用以林分密度的影响为主, 故交互作用提高了土壤脲酶和酸性磷酸酶活性; 林分密度对土壤过氧化氢酶的活性的作用小于氮磷添加, 因此各个密度林分施 N 和 N+P 后, 二者的交互作用抑制了土壤的过氧化氢酶活性, 而施 P 后二者的交互作用提高了土壤的过氧化氢酶活性。根据生态学的最优分配原则, 微生物和植物倾向于投入更多能量去增加获取迫切所需资源的胞外酶活性。NP 添加处理能够在一定程度上缓解高密度带来的养分限制^[8], 影响土壤的酸碱性和养分可利用性, 从而影响相关的酶活性。林分密度能够影响幼苗对土壤营养物质的吸收利用, 引起了土壤养分含量的变化, 从而影响 NP 添加对土壤酶活性的效果。林分密度的增大导致植物个体对土壤 C、N、P 等重要营养元素的大量吸收引起了养分限制, 增大了土壤酶的分泌量和活性^[36,39], 也能够一定程度上缓解过大的土壤 NP 含量对植物和土壤微生物的毒害与限制作用。因此, NP 添加和林分密度的交互作用对三种土壤酶活性有显著影响。

4 结论

综合分析表明, 外源性 NP 添加和不同林分密度处理显著影响了华南地区大叶相思人工林的土壤化学性质, 从而影响三种土壤酶的活性。N 添加对各林分密度下的土壤脲酶和过氧化氢酶活性均有抑制作用, 施 P 显著提高了过氧化氢酶活性和高密度林分大叶相思林地的土壤脲酶活性, 却降低了低密度林分的土壤脲酶活性。施 P 和 N+P 处理的土壤磷酸酶活性显著降低。随着林分密度的升高, 土壤脲酶、磷酸酶以及对对照和 P 添加处理的过氧化氢酶活性均增大, 而过氧化氢酶活性在 N 和 N+P 添加处理下减小。此外, NP 添加和林分密度的交互作用对三种土壤酶活性均有显著影响。

在当前全球 N 沉降和 P 肥广泛施用的背景下, 研究林分密度和外源性 NP 添加对土壤酶活性的影响, 对探讨不同种植密度和管理措施影响我国南方人工林土壤养分转化的酶学机制有重要意义。N 沉降和 P 添加能够影响土壤的化学性质, 而林分密度则通过改变林地环境和土壤微生物特性而对土壤酶活性产生重要影响。研究 NP 添加和林分密度交互作用对人工林土壤酶活性的影响, 有利于根据不同林分密度和当地 N 沉降水平, 选择合理的施肥方式和养分管理措施。

参考文献 (References):

- [1] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, Chadwick O A. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus

- interactions. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 5-15.
- [2] Chen H, Zhang W, Gilliam F, Liu L, Huang J, Zhang T, Wang W, Mo J. Changes in soil carbon sequestration in *Pinus massoniana* forests along an urban-to-rural gradient of southern China. *Biogeosciences*, 2013, 10(10): 6609-6616.
- [3] 刘思言, 陈瑾, 卢平, 李来胜, 陈中颖. 广东韶关地区大气氮干湿沉降特征研究. *生态环境学报*, 2014, 23(9): 1445-1450.
- [4] Chen X Y, Mulder J. Atmospheric deposition of nitrogen at five subtropical forested sites in South China. *Science of the Total Environment*, 2007, 378(3): 317-330.
- [5] 陈瑶, 王法明, 莫其锋, 李钦禄, 邹碧, 李应文, 李晓波, 吴靖滔, 李志安. 氮磷添加对华南热带森林尾叶桉木质残体分解和养分动态的影响. *应用与环境生物学报*, 2015, 21(4): 747-753.
- [6] 李洁, 薛立. 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*, 2017, 30(2): 14-19.
- [7] 黄锦妮, 程煜, 杨红玉, 郑凯舟, 王家骏. 模拟 N 沉降下三种林分土壤营养动态分析. *生态学报*, 2017, 37(1): 63-73.
- [8] 朱仕明, 董喜光, 薛立, 肖玲玲, 张越. 外源性氮和磷添加对黎蒴林土壤养分及生化特性的影响. *安徽农业大学学报*, 2015, 42(3): 347-352.
- [9] 董喜光, 张越, 薛立, 肖玲玲, 朱仕明, 曾曙才. 火力楠林的土壤特性对外源性 N 和 P 的响应. *中南林业科技大学学报*, 2016, 36(9): 104-108, 113-113.
- [10] 刘星, 汪金松, 赵秀海. 模拟氮沉降对太岳山油松林土壤酶活性的影响. *生态学报*, 2015, 35(14): 4613-4624.
- [11] Zhou X B, Zhang Y M. Temporal dynamics of soil oxidative enzyme activity across a simulated gradient of nitrogen deposition in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China. *Geoderma*, 2014, 213: 261-267.
- [12] Wang Q K, Wang S L, Liu Y X. Responses to N and P fertilization in a young *Eucalyptus dunnii* plantation: microbial properties, enzyme activities and dissolved organic matter. *Applied Soil Ecology*, 2008, 40(3): 484-490.
- [13] 余汉基, 薛立. 森林土壤酶活性对氮沉降的响应. *世界林业研究*, 2018, 31(1): 7-12.
- [14] Mincheva T, Barni E, Varese G C, Brusa G, Cerabolini B, Simiscalco C. Litter quality, decomposition rates and saprotrophic mycoflora in *Fallopia japonica* (Houtt.) Ronse Decraene and in adjacent native grassland vegetation. *Acta Oecologica*, 2014, 54: 29-35.
- [15] 邵英男, 刘延坤, 李云红, 陈瑶, 田松岩. 不同林分密度长白落叶松人工林土壤养分特征. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(9): 27-31.
- [16] 孙千惠, 吴霞, 王媚臻, 张柳桦, 姚小兰, 齐锦秋, 郝建锋. 林分密度对马尾松林下物种多样性和土壤理化性质的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(3): 732-738.
- [17] 王媚臻, 毕浩杰, 金锁, 刘佳, 刘宇航, 王宇, 齐锦秋, 郝建锋. 林分密度对云顶山柏木人工林下物种多样性和土壤理化性质的影响. *生态学报*, 2019, 39(3): 981-988.
- [18] 冯宜明, 李毅, 曹秀文, 刘锦乾, 齐瑞, 赵阳, 陈学龙. 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*, 2018, 54(10): 20-30.
- [19] Lie Z Y, Wang Z M, Xue L. Effect of density of *Tephrosia candida* stands on soil characteristics. *Legume Research-An International Journal*, 2017, 40(3): 551-555.
- [20] 董威, 刘泰瑞, 覃志杰, 郭晋平, 张芸香. 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*, 2019, 28(1): 65-72.
- [21] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 刘文飞, 刘苑秋. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响. *生态学报*, 2012, 32(2): 517-527.
- [22] 钟晓兰, 李江涛, 李小嘉, 叶永昌, 刘颂颂, 徐国良, 倪杰. 模拟氮沉降增加条件下土壤团聚体对酶活性的影响. *生态学报*, 2015, 35(5): 1422-1433.
- [23] 蔡玉婷, 黄永芳, 张太平, 肖辉林, 李跃林. 模拟氮沉降对木荷人工幼林地土壤氮素、碳素和微生物量垂直分布的影响. *生态环境学报*, 2013, 22(5): 755-760.
- [24] 林婉奇, 蔡金桓, 薛立. 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*, 2019, 39(24): 9162-9170.
- [25] Aerts R, Van Logtestijn R S P, Karlsson P S. Nitrogen supply differentially affects litter decomposition rates and nitrogen dynamics of sub-arctic bog species. *Oecologia*, 2006, 146(4): 652-658.
- [26] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [27] Hu Y L, Jung K, Zeng D H, Chang S X. Nitrogen- and sulfur-deposition-altered soil microbial community functions and enzyme activities in a boreal mixedwood forest in western Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 2013, 43(9): 777-784.
- [28] 涂利华, 胡红玲, 胡庭兴, 张健, 肖银龙, 雒守华, 李仁洪, 戴洪忠. 模拟氮沉降对华西雨屏区光皮桦林土壤酶活性的影响. *应用生态学报*, 2012, 23(8): 2129-2134.
- [29] 苏洁琼, 李新荣, 鲍婧婷. 施氮对荒漠化草原土壤理化性质及酶活性的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 664-670.
- [30] DeForest J L, Zak D R, Pregitzer K S, Burton A J. Atmospheric nitrate deposition, microbial community composition, and enzyme activity in

- northern hardwood forests. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(1): 132-138.
- [31] Cusack D F, Silver W L, Torn M S, Burton S D, Firestone M K. Changes in microbial community characteristics and soil organic matter with nitrogen additions in two tropical forests. *Ecology*, 2011, 92(3): 621-632.
- [32] 郑棉海, 黄娟, 陈浩, 王晖, 莫江明. 氮、磷添加对不同林型土壤磷酸酶活性的影响. *生态学报*, 2015, 35(20): 6703-6710.
- [33] 王冰冰, 曲来叶, 马克明, 张心昱, 宋成军. 岷江上游干旱河谷优势灌丛群落土壤生态酶化学计量特征. *生态学报*, 2015, 35(18): 6078-6088.
- [34] Olander L P, Vitousek P M. Regulation of soil phosphatase and chitinase activity by N and P availability. *Biogeochemistry*, 2000, 49(2): 175-191.
- [35] Weand M P, Arthur M A, Lovett G M, Sikora F, Weathers K C. The phosphorus status of northern hardwoods differs by species but is unaffected by nitrogen fertilization. *Biogeochemistry*, 2010, 97(2): 159-181.
- [36] Turner B L, Wright S J. The response of microbial biomass and hydrolytic enzymes to a decade of nitrogen, phosphorus, and potassium addition in a lowland tropical rain forest. *Biogeochemistry*, 2014, 117(1): 115-130.
- [37] Allison S D, Vitousek P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(5): 937-944.
- [38] Marklein A R, Houlton B Z. Nitrogen inputs accelerate phosphorus cycling rates across a wide variety of terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 2012, 193(3): 696-704.
- [39] 洪慧滨, 林成芳, 彭建勤, 陈岳民, 魏翠翠, 杨玉盛. 磷添加对中亚热带米槠和杉木细根分解及其酶活性的影响. *生态学报*, 2017, 37(1): 136-146.
- [40] Guo P, Wang C Y, Feng X G, Su M F, Zhu W Q, Tian X J. Mixed inorganic and organic nitrogen addition enhanced extracellular enzymatic activities in a subtropical forest soil in east China. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011, 216(1): 229-237.
- [41] Lv Y N, Wang C Y, Wang F Y, Zhao G Y, Pu G Z, Ma X, Tian X J. Effects of nitrogen addition on litter decomposition, soil microbial biomass, and enzyme activities between leguminous and non-leguminous forests. *Ecological Research*, 2013, 28(5): 793-800.
- [42] Blackwood C B, Waldrop M P, Zak D R, Sinsabaugh R L. Molecular analysis of fungal communities and laccase genes in decomposing litter reveals differences among forest types but no impact of nitrogen deposition. *Environmental Microbiology*, 2007, 9(5): 1306-1316.
- [43] 贺志龙, 张芸香, 郭跃东, 杨三红, 任达, 丁继伟, 郭晋平. 不同密度华北落叶松林天然林土壤养分特征研究. *生态环境学报*, 2017, 26(1): 43-48.
- [44] 赵汝东, 樊剑波, 何园球, 宋春丽, 屠人凤, 谭炳昌. 林分密度对马尾松林下土壤养分及酶活性的影响. *土壤*, 2012, 44(2): 297-301.
- [45] Kang H, Kang S, Lee D. Variations of soil enzyme activities in a temperate forest soil. *Ecological Research*, 2009, 24(5): 1137-1143.