

氮沉降对低磷胁迫下毛竹实生幼苗生长及土壤化学特性的影响

胡支舰, 庾金武, 陈健, 翁昌华, 宋付平, 应叶青

(浙江农林大学, 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300)

摘要: 为了探究氮沉降对低磷土壤化学性状及毛竹 *Phyllostachys edulis* 实生幼苗生长的影响, 以毛竹实生幼苗为材料, 设计了4个不同的土壤磷水平 P_0 (2.29 mg·kg⁻¹)、 P_1 (5 mg·kg⁻¹)、 P_2 (7.29 mg·kg⁻¹)、 P_3 (10 mg·kg⁻¹), 同时模拟了3个不同的氮沉降水平 N_0 (0 kg·hm⁻²·a⁻¹)、 N_1 (30 kg·hm⁻²·a⁻¹)、 N_2 (60 kg·hm⁻²·a⁻¹), 分析氮沉降对低磷土壤的电导率、pH 和 N、P、K 含量, 以及毛竹实生幼苗生长的影响。结果表明, 与对照相比, 单独氮沉降 (P_0N_2) 显著提高低磷土壤电导率、有效氮含量、有效磷含量 ($P<0.05$), 分别比对照增加 30.01%、75.00% 和 9.76%; 降低低磷土壤 pH、显著降低土壤速效钾含量, 降幅分别为 -1.52% 和 -33.96% ($P<0.05$)。氮沉降 (P_0N_2) 显著增加毛竹幼苗生物量和根冠比 ($P<0.05$), 分别比对照增加了 24.59% 和 76.38%; 氮沉降 (P_0N_2) 能抑制株高和叶面积的生长, 分别比对照下降了 14.04% 和 0.95%, 但差异不显著 ($P>0.05$)。上述结果表明, 一定量的氮沉降对低磷胁迫下毛竹实生幼苗生长有有利影响。

关键词: 氮沉降; 低磷胁迫; 毛竹; 生长特性; 化学特性

中图分类号: S714.8; S795.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3776 (2021) 02-0017-06

Effect of Nitrogen Deposition on Growth of *Phyllostachys edulis* Seedlings and Soil Chemical Properties under Low Phosphorus Stress

HU Zhi-jian, YU Jin-wu, CHEN Jian, WENG Chang-hua, SONG Fu-ping, YING Ye-qing

(State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China)

Abstract: On November 1st 2018, current year seeds of *Phyllostachys edulis* were collected from Lin'an, Zhejiang province, and were sowed in containers on November 20th of the same year. The soil was from 1m depth of *Ph. edulis* stand. On January 20th 2019, seedlings were transplanted in containers for experiment of different phosphorus treatments (2.29, 5, 7.29 and 10 mg·kg⁻¹) and different nitrogen deposition (0, 30, 60 kg/ha) a year. The treatment of 2.29 mg·kg⁻¹ of phosphorus and 0 nitrogen was the control. In March 2019, determinations were conducted on soil conductivity, pH, N, P, K content, and growth traits of *Ph. edulis* seedlings. The results showed that the treatment with 2.29 mg·kg⁻¹ phosphorus and 60 kg/ha nitrogen could significantly increase soil conductivity, available nitrogen and available phosphorus by 30.01%, 75.00% and 9.76% of the control, and could reduce soil pH, significantly reduce available potassium soil by -1.52% and -33.96%. The treatment significantly increased the biomass and root shoot ratio of *Ph. edulis* seedlings by 24.59% and 76.38%, while inhibited the height and leaf area growth by 14.04% and 0.95%, but not significantly.

Key words: nitrogen deposition; low phosphorus stress; *Phyllostachys edulis*; growth traits; chemical properties

收稿日期: 2020-11-07; 修回日期: 2021-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31770645); 浙江农林大学学生科研训练项目 (KX20180035)

作者简介: 胡支舰, 本科, 从事森林培育研究; E-mail: 1095164029@qq.com。通信作者: 应叶青, 博士, 教授, 从事森林培育研究; E-mail: 845464062@qq.com。

毛竹 *Phyllostachys edulis* 属单子叶禾本科 Gramineae 竹亚科 Bambusoideae 刚竹属 *Phyllostachys* 植物,是我国分布最广、面积最大、经济价值最高的竹种,约占全国竹林面积的 70%,世界毛竹林面积的 80%,在我国森林资源与山区经济中发挥着重要的作用。主要分布在土壤铁、铝含量丰富,有效磷素严重缺乏的高温多雨的亚热带区域^[1-2]。南方黄红壤普遍存在 pH 值低、有效磷缺乏等问题。近年来,南方大气氮沉降也日益严重^[3],对我国南方亚热带地区的农林业发展产生了一定的影响。如何有效解决氮沉降和磷胁迫对植物生长发育的影响成为了一个亟需解决的问题。磷素对植物生长发育的影响在国内外已开展了大量的研究,王秀荣^[4]等对大豆 *Glycine max* 根系的研究认为当外界有效磷较低时,植物能够将更多的碳源分配到根系,促进根系生长,提高根冠比,侧根数、根毛数目和长度会明显增加,根系在表层土壤的分布增多,形成“伞状”根构型。Fredeen^[5]等研究表明,低磷胁迫使大豆叶面积减少 67%,新叶发生减少 43%,光合速率降低 43%,进而影响根冠比。华瑞^[6]等在对普通小麦 *Triticum aestivum* 及玉蜀黍 *Zea mays* 生物量反应上的研究发现低磷胁迫下普通小麦和玉蜀黍植株会变得矮小,叶面积变小。但至今国内外已经进行的磷胁迫效应研究主要集中在少数农作物方面,而关于缺磷土壤对毛竹的影响的研究相对较少;除此之外,日益明显的氮沉降问题对毛竹的影响同样不容忽视^[3]。我国南方是大气氮沉降的集中区之一,该地区大气中活性氮污染已经很严重^[7]。现阶段,已有研究发现毛竹林的生长受到了土壤氮和磷含量的制约^[8-9],模拟氮沉降显著增加了毛竹叶片中的氮含量但加剧了磷的缺乏^[10-11],但土壤磷素缺乏和氮沉降下对毛竹实生苗生长过程产生的影响,种苗生长过程中磷素不足氮素能否起到补偿作用仍不清楚,需进一步的实验研究。

本实验选用毛竹林中 1 m 以下深层土壤,采用完全随机设计,设计 3 个氮沉降水平和 4 个磷水平,开展容器育苗试验,统计毛竹实生苗的生长状况,测定土壤 pH 等理化指标,分析氮沉降对低磷胁迫下毛竹实生幼苗生长及土壤化学特性的影响,以期揭示氮沉降对低磷条件下毛竹幼苗生长的影响机理,同时也为高效毛竹实生苗网袋容器育苗中磷素和氮素的添加提供参考。

1 研究区概况

实验地点设于浙江省杭州市临安区(118°51'~119°52'E, 29°56'~30°23'N)浙江农林大学温室大棚,属季风型气候,温暖湿润,光照充足,雨量充沛,四季分明。1 月平均气温为 5.1℃,7 月平均气温为 30℃,年均气温在 13℃左右;年均降水量为 1 613.9 mm,降水日 158 d,无霜期为 237 d,会受台风、寒潮等灾害性天气影响。

2 材料与方法

2.1 试验材料

实验通过 Ca(H₂PO₄)₂ 调配育种袋中磷浓度水平,通过 NH₄NO₃ 模拟氮沉降过程。先将本地采集的当年生毛竹种子于 2018 年 11 月 1 日在清水中浸泡 24 h,捞出后自然晾干后,放入人工气候箱中,将温度设置为 25℃,湿度为 80%,使其露白。然后,于 2018 年 11 月 20 日,挑选籽粒大小相当的种子种植于装有土壤的直径×高为 4.5 cm×10 cm 的育苗袋中,每育苗袋中种植一粒种子,各处理分别设置 100 个育苗袋。所用土壤为毛竹林中 1 m 以下深层土壤,土壤基本肥力特性见表 1。于 2 个月后,即 2019 年 1 月 20 日从各处理选取长势良好且相似的 6 株幼苗移入直径 15 cm×高 15 cm 中袋培育,培养期间保持其余条件相同且最适于毛竹生长。

表 1 实验土壤基本肥力特性
Table 1 Soil Fertility for experimental

项目	有效氮/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	pH	电导率/(μS·cm ⁻¹)
实验土壤	14.00	2.29	25.30	4.70	29.1

2.2 试验设计

设计 4 种磷水平,土壤的磷含量分别为 $P_0(2.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ 、 $P_1(5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ 、 $P_2(7.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ 、 $P_3(10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1})$;模拟 3 种氮沉降水平,分别为 $N_0(0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$ 、 $N_1(30 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$ 、 $N_2(60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$ 。在毛竹种子播种前将 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 配制成不同浓度的溶液添加到土壤中至土壤饱和,以此调配各处理育苗袋磷水平,并于 2018 年 11 月 20 日播种后对毛竹种子模拟一次氮沉降,以后每月 20 日对毛竹进行一次模拟氮沉降。模拟氮沉降方法:将 NH_4NO_3 按上述 3 种氮沉降水平各自溶解在 1 L 蒸馏水中,以背式喷雾器人工来回均匀喷洒在毛竹幼苗上,对照喷洒等量蒸馏水。实验共 12 个处理,每个处理 100 粒种子,共 1 200 粒种子。移入中袋后同样为 12 个处理,每个处理 6 株幼苗,共 72 株幼苗。

在移入中袋 2 个月后,即 2019 年 3 月 20–31 日,对各处理采用 pH 计测定土壤 pH;采用钼锑钒比色法测定土壤有效磷含量;利用电导率计测定土壤电导率值;采用碱解扩散法测定土壤有效氮含量;采用火焰光度计法测定速效钾含量^[12]。3 月 20 日,各处理取 6 株生长状况相似幼苗测定其生长指标,用钢卷尺量取从毛竹根茎处到最高分枝处的高度作为株高;取各处理从下到上第 6 片叶片测定叶面积;通过天平测量烘干后的毛竹干质量,即生物量,再测量毛竹地下部分与地上部分干质量的比值,即根冠比。(下表 2 中 P_0N_0 土壤肥力特征为种植毛竹幼苗 4 个月后所测定数据。)

土壤有效磷含量(W_P)计算方法为:

$$W_P = (A \times V \times ts) / m$$

式中, A 为从工作曲线上查得的质量浓度 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; V 为显色时定容体积 mL; ts 为分取倍数; m 为风干土壤质量 g。

土壤有效氮含量(W_N)计算方法为:

$$W_N = (V_1 - V_0) \times c \times M \times 1\,000 / m$$

式中, V_1 为滴定土样所用硫酸体积 mL; V_0 为滴定空白样所用硫酸体积 mL; c 为硫酸标准溶液浓度 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; M 为氮原子的摩尔质量 g; m 为土样质量 g。

土壤速效钾含量(W_K)计算方法为:

$$W_K = (C \times V \times ts) / m$$

式中, C 为从工作曲线上查得的质量浓度 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; V 为显色时定容体积 mL; ts 为分取倍数; m 为风干土质量 g。

2.3 数据处理

采用 Excel 2016 处理试验数据并制作表格,使用 SPSS 软件进行数据处理,采用一元方差分析,对各处理间的平均值进行多重比较分析 ($P < 0.05$);采用双因素方差分析比较 P 和 N 沉降两者的交互作用;采用双变量相关性分析进行土壤化学特性与毛竹幼苗生长特性的相关分析。

3 结果与分析

3.1 氮沉降对低磷胁迫下土壤化学特性的影响

多元方差分析结果表明(表 2),氮沉降作为独立因子显著影响土壤有效氮含量、有效磷含量、速效钾含量、pH、电导率 ($P < 0.05$),磷作为独立因子显著影响土壤有效氮含量、有效磷含量、速效钾含量、电导率 ($P < 0.05$),两者交互作用对土壤有效氮含量、有效磷含量、速效钾含量、电导率有显著影响 ($P < 0.05$)。单独氮沉降下, P_0N_2 处理的土壤有效氮含量、有效磷含量和电导率比 P_0N_0 处理分别上升 75%、9.76%和 30.05%;土壤速效钾含量、pH 比 P_0N_0 分别下降 33.96%和 1.52%。单独磷处理下, P_3N_0 处理的土壤有效磷含量和速效钾含量分别比 P_0N_0 处理上升 209.02%和 51.23%;土壤 pH 和电导率分别比 P_0N_0 下降 0.43%和 2.93%;土壤有效氮含量和有效磷含量在氮和磷的交互作用 (P_3N_2) 下显著升高 ($P < 0.05$),分别比对照高出了 150%和 249.51%。

表 2 氮沉降对低磷胁迫下土壤特性的影响
Table 2 Effect of nitrogen deposition on soil chemical properties under low phosphorus stress

处理	有效氮/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	pH	电导率/(μS·cm ⁻¹)
P ₀ N ₀	14.00±1.00 g	4.10±0.26 g	32.83±1.33 j	4.62±0.03 d	37.6±0.53 i
P ₀ N ₁	21.00±1.00 d	3.83±0.49 g	36.59±1.29 h	4.54±0.02 e	48.0±1.02 b
P ₀ N ₂	24.50±0.50 c	4.50±0.10 g	21.68±1.06 l	4.55±0.06 c	48.9±1.12 a
P ₁ N ₀	28.00±1.00 b	5.37±0.23 f	64.44±1.65 a	4.53±0.02 f	40.6±0.98 f
P ₁ N ₁	28.00±1.00 b	6.47±0.70 e	50.81±1.14 d	4.51±0.04 h	47.0±1.24 d
P ₁ N ₂	28.00±1.00 b	10.37±1.06 c	62.12±1.32 b	4.42±0.04 g	47.7±1.17 c
P ₂ N ₀	14.00±1.00 g	8.33±0.35 d	59.25±1.26 c	4.64±0.06 c	37.3±1.15 j
P ₂ N ₁	14.00±1.00 g	10.23±0.12 c	33.30±1.03 i	4.75±0.03 a	40.4±1.08 g
P ₂ N ₂	17.50±1.00 f	10.93±0.21 c	30.29±1.02 k	4.67±0.03 b	35.5±1.11 h
P ₃ N ₀	14.00±1.00 g	12.67±0.42b	49.65±1.11 e	4.60±0.04 c	36.5±0.78 k
P ₃ N ₁	21.00±1.00 e	13.03±0.38 b	44.53±1.21 f	4.68±0.06 b	42.2±1.34 e
P ₃ N ₂	35.00±1.00 a	14.33±0.90 a	43.23±1.31 g	4.66±0.04 c	42.3±1.23 e
F _N	**	**	**	*	**
F _P	**	**	**	ns	**
F _{N×P}	**	**	**	ns	**

注：同一列数字后不同字母代表差异显著 ($P<0.05$)；ns、*、**分别表示 $P>0.05$ 、 $0.01<P\leq 0.05$ 、 $P\leq 0.01$ 水平下差异不显著、差异显著和差异极显著；F_N表示氮效应；F_P表示磷效应；F_{N×P}表示氮与磷的交互效应；下同。

3.2 氮沉降对不同土壤磷水平下毛竹生长的影响

多元方差分析结果表明（表 3），氮沉降作为独立因子影响了毛竹幼苗株高、生物量和根冠比，磷作为独立因子影响了毛竹幼苗株高、生物量、根冠比，两者交互作用下影响了毛竹幼苗株高、生物量、根冠比。各因子对毛竹幼苗叶面积有一定的影响但差异不显著 ($P>0.05$)。单独氮沉降在 P₀ 和 P₁ 条件下对毛竹幼苗根冠比影响为先降低后增加，在 P₂ 和 P₃ 条件下降低毛竹幼苗根冠比，P₀N₂ 处理的毛竹幼苗生物量和根冠比比 P₀N₀ 处理分别上升 25.49%和 76.38%；毛竹幼苗株高和叶面积分别比 P₀N₀ 处理下降 14.04%和 0.95%。单独磷处理（P₀N₀、P₁N₀、P₂N₀、P₃N₀）下毛竹幼苗各生长特性均随磷浓度的增加而呈现先下降后增加的趋势，但 P₃N₀ 处理的毛竹幼苗生长特性和 P₀N₀ 相比均无显著变化 ($P<0.05$)。交互作用 P₃N₂ 条件下，毛竹幼苗株高、叶面积和根冠比降低但不显著 ($P>0.05$)，比 P₀N₀ 处理分别下降了 15.42%、6.41%和 41.73%，但显著增加 ($P<0.05$) 了毛竹幼苗生物量，比 P₀N₀ 处理上升了 16.63%。

表 3 氮沉降对低磷胁迫下毛竹实生幼苗生长的影响
Table 3 Effect of nitrogen deposition on the growth of *Ph. edulis* seedlings under low phosphorus stress

处理	株高/cm	叶面积/cm ²	生物量/mg	根冠比
P ₀ N ₀	11.54±0.77 a	8.43±0.51 a	67.23±0.06 d	1.27±0.06 b
P ₀ N ₁	10.80±1.52 abc	7.34±1.30 a	41.17±0.60 hi	0.61±0.04 bc
P ₀ N ₂	9.92±1.18 abcd	8.35±0.51 a	84.37±1.85 a	2.24±0.07 a
P ₁ N ₀	9.68±0.82 abcd	7.85±1.13 ab	41.97±2.11 h	1.12±0.04 bc
P ₁ N ₁	9.42±2.53 bcd	6.92±1.53 ab	38.27±1.45 i	0.94±0.03 bc
P ₁ N ₂	8.32±0.91 d	7.92±1.06 ab	52.30±2.55 f	1.31±0.08 b
P ₂ N ₀	9.86±1.70 abcd	7.66±1.38 ab	58.13±2.15 e	1.24±0.05 b
P ₂ N ₁	9.01±2.29 cd	8.02±0.88 ab	71.63±0.66 c	0.99±0.04 bc
P ₂ N ₂	8.86±1.29 d	8.11±0.35 ab	48.33±1.34 g	0.56±0.02 c
P ₃ N ₀	10.88±1.40 ab	8.32±1.16 ab	64.63±1.26 d	1.27±0.08 b
P ₃ N ₁	9.51±0.98 bcd	7.97±0.94 ab	78.81±2.78 b	0.78±0.05 bc
P ₃ N ₂	9.76±1.66 abcd	7.89±0.85 b	78.41±1.75 b	0.74±0.08 bc
F _N	*	ns	**	*
F _P	**	ns	**	*
F _{N×P}	**	ns	**	**

3.3 土壤化学特性与毛竹幼苗生长特性的相关性分析

相关性分析结果表明(表 4),毛竹幼苗株高与土壤有效氮含量和有效磷含量均呈显著性负相关($P<0.05$)。毛竹幼苗叶面积与土壤有效氮含量和速效钾含量均呈显著性负相关($P<0.05$),与土壤电导率呈极显著负相关($P<0.01$)。毛竹幼苗生物量与土壤有效磷含量呈显著性正相关($P<0.05$),与土壤 pH 呈极显著正相关($P<0.01$),与土壤速效钾含量呈极显著负相关($P<0.01$)。毛竹幼苗根冠比与土壤有效磷含量呈显著负相关($P<0.05$)。

表 4 土壤化学特性与毛竹幼苗生长特性的相关性系数
Table 4 Correlation coefficients between soil chemical properties and growth traits of *Ph. pubescens* seedlings

处理	有效氮	有效磷	速效钾	pH	电导率
株高	-0.354*	-0.401*	-0.243	0.077	-0.206
叶面积	-0.359*	0.193	-0.379*	0.319	-0.434**
生物量	-0.081	0.373*	-0.462**	0.506**	-0.063
根冠比	-0.034	-0.361*	-0.131	-0.323	0.269

4 讨论与结论

氮素和磷素是植物生长发育最重要的养分之一,磷素和氮素的缺乏都会对植物的生长起到不良作用。磷素是植物生长的必需营养元素之一,参与了植物的光合作用、呼吸代谢、能量转化、信号转导、生物大分子合成以及酶活性的调节等,在植物整个新陈代谢过程中扮演着十分重要的角色,磷素缺乏会对植物体造成损伤,引起植物生物量下降^[13],同时,有效磷和速效钾在森林生态系统中最初净生产力、有机物的分解等中扮演重要的角色。氮素的有效利用能调节植物体的营养平衡^[14],适度的大气氮沉降对植物生长有着促进作用^[15-16],植物吸收土壤磷素能力与土壤 pH 值和电导率等有关^[17],蔡乾坤等^[18]对杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林进行氮沉降后发现随着施氮量的增加,土壤铵态氮、硝态氮和有效氮含量呈上升趋势,有效磷的含量在氮处理(120 kg·hm⁻²·a⁻¹)中最高。本研究发现,氮沉降显著增加土壤有效氮含量、有效磷含量和电导率($P<0.05$);显著降低土壤速效钾含量和 pH($P<0.05$)。其可能原因是氮沉降中的 NH₄⁺和 NO₃⁻能增强磷酸酶活性,促进土壤有效磷的转化^[19-20];同时氮沉降会引起表层土壤速效钾大量淋溶,造成土壤表层的 K⁺向下迁移,导致上层土壤中速效钾含量降低^[21]。添加磷素增加了土壤有效磷含量和速效钾含量,降低了土壤 pH 和电导率。陶晨悦等^[13]的研究表明,磷匮乏对幼苗生长具有严重的抑制作用,幼苗生物量向根系分配比例增大以促进根系生长,氮沉降对低磷水平下毛竹实生苗的生长无任何促进作用,但促进中、高磷条件下毛竹幼苗生长。李德军^[22-23]等对黄果厚壳桂 *Cryptocarya concinna* 研究表明,在 15 kg·hm⁻²·a⁻¹ 氮沉降条件下幼苗的基径、株高、全株生物量以及相对生长速率均为最好。这与本研究结果有异同之处,本研究发现,氮沉降显著增加毛竹幼苗生物量和根冠比($P<0.05$);降低毛竹幼苗株高和叶面积但不显著($P>0.05$)。其可能原因是氮沉降增加了土壤有效磷含量,降低了土壤速效钾含量,从而提高了毛竹幼苗生物量,氮沉降导致土壤 pH 降低,进而影响毛竹幼苗更偏向于根部的生长,从而导致毛竹根冠比增加,同时,一定量的外源氮素能提高毛竹的光合能力^[24],从而提高植物体生物量。氮沉降增加了土壤有效氮含量,从而导致了毛竹幼苗株高的降低。在低磷条件下,添加磷素对毛竹幼苗各生长特性作用均为先抑制后促进,但 P₃ 处理与 P₀ 处理之间差异不显著($P>0.05$)。说明低磷环境下磷素含量的差异对毛竹幼苗生长特性的影响不大。

综上所述,一定量的氮沉降对毛竹幼苗生长特性(株高和叶面积)的抑制作用并不显著,但能显著促进毛竹幼苗生物量和根冠比等生长特性。因此,总体来说,一定量的氮沉降对低磷胁迫下毛竹幼苗生长有促进作用。

参考文献:

[1] 王海霞,应国庆,彭九生,等. 江西毛竹林土壤肥力初步研究[J]. 竹子研究汇刊, 2008 (03): 42–44.
[2] 蒋俊明,朱维双,刘国华,等. 川南毛竹林土壤肥力研究[J]. 浙江林学院学报, 2008 (04): 486–490.
[3] 王巧,张君波,雷赵枫,等. 模拟氮沉降和磷添加对杉木生态化学计量学特征的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38 (02): 368–375.
[4] WANG X, YAN X, LIAO H. Genetic improvement for phosphorus efficiency in soybean aradical approach[J]. Ann Bot, 2010, 106: 215–22.

