

doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.06.025

施肥对云南松生长及其器官和土壤养分的影响

彭思华¹, 余杰¹, 李莲芳², 王慷林², 陈超¹, 毛家伟¹, 郭太堂¹

(1. 中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 云南 昆明 650111; 2. 西南林业大学, 云南 昆明 650224)

摘要:为探究配方施肥对云南松松针养分含量和土壤理化性质的影响,为云南松幼林抚育提供科学依据,以 8 年生云南松为试材,采用 $U_{15}(15^7)$ 均匀设计开展复合肥、氮肥、磷肥、镁肥和硼肥配施的试验。处理组合的针叶长、烘干含水率、针叶全氮、全磷和全钾分别为 23.90~27.34 cm、55.47%~60.88%、0.17%~0.57%、0.13%~0.33% 和 0.17%~0.82%, 对照的则为 24.14 cm、60.75%、0.35%、0.17% 和 0.29%。其中,全磷和全钾具有显著的差异。处理组合的土壤 pH、烘干含水率、速效氮、速效磷、速效钾和胸径增长率分别为 4.08~4.69、17.27%~34.59%、22.77~41.91、7.70~11.80、66.44~174.67 mg/kg 和 23.5%~50.3%, 对照的则为 4.42、17.27%、23.70、8.23、81.11 mg/kg 和 22.4%, 处理组合间速效磷、速效钾和胸径增长率具有极显著的差异。土壤理化性质与因素具有复杂的相关性,硼肥与胸径增长率呈现显著的正相关;配施复合肥 1.6 kg/3 cm、氮肥 0.10 kg/3 cm、磷肥 0.2 kg/3 cm、镁肥 7.5 g/3 cm 和硼肥 1.5 g/3 cm 可改善土壤理化性质,促进云南松幼树胸径生长。

关键词:云南松;均匀试验;施肥;松针;土壤理化性质

中图分类号:S791.257;S753.532;S714.5 文献标识码:A 文章编号:1671-3168(2023)06-0144-07

引文格式:彭思华,余杰,李莲芳,等.施肥对云南松生长及其器官和土壤养分的影响[J].林业调查规划,2023,48(6):144-150. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.06.025

PENG Sihua, YU Jie, LI Lianfang, et al. Effects of Fertilization on Growth and Soil Nutrients of *Pinus yunnanensis* [J]. Forest Inventory and Planning, 2023, 48(6):144-150. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.06.025

Effects of Fertilization on Growth and Soil Nutrients of *Pinus yunnanensis*

PENG Sihua¹, YU Jie¹, LI Lianfang², WANG Kanglin², CHEN Chao¹,
MAO Jiawei¹, GUO Taitang¹

(1. Kunming Natural Resources Comprehensive Investigation Center, China Geological Survey, Kunming 650111, China;
2. Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: To explore the effects of combined application on the nutrient content of pine needles and soil physical and chemical properties of *Pinus yunnanensis*, and to provide scientific basis for the tending of young forests, the uniform design of $U_{15}(15^7)$ was used to carry out the experiment of combined application of compound fertilizer, nitrogen fertilizer, phosphate fertilizer, magnesium fertilizer and boron with 8-year-old growing *P. yunnanensis* as the test material. The needle length, drying moisture content, total

收稿日期:2022-06-01.

基金项目:国家“十三五”重点研发计划“林业资源培育及高效利用技术创新重点专项”(2017YFD 0600504-1).

第一作者:彭思华(1994-),女,云南腾冲人,硕士研究生.主要从事森林培育方向的研究. Email:2356922321@qq.com

责任编辑:李莲芳(1964-),女,云南墨江人,教授,博士生导师.主要从事森林培育和林木遗传育种及林学相关教学和研究.

Email:1764199393@qq.com

nitrogen, total phosphorus and total potassium of the treatment combination were 23.90–27.34 cm, 55.47%–60.88%, 0.17%–0.57%, 0.13%–0.33% and 0.17%–0.82%, respectively, while the controls were 24.14 cm, 60.75%, 0.35%, 0.17% and 0.29%, and total phosphorus and total potassium had significant difference. The growth rates of soil pH, drying moisture content, available nitrogen, available phosphorus, available potassium and DBH were 4.08–4.69, 17.27%–34.59%, 22.77–41.91, 7.70–11.80, 66.44–174.67 mg/kg and 23.5%–50.3%, respectively, while the values in the control group were 4.42, 17.27%, 23.70, 8.23, 81.11 mg/kg and 22.4%, and the growth rates of available P, available K and DBH in the control group were significantly different. The physical and chemical properties of soil had a complex correlation with the factors, and boron fertilizer was significantly positively correlated with the growth rate of DBH. The combined application of 1.6 kg/3 cm compound fertilizer, 0.10 kg/3 cm nitrogen fertilizer, 0.2 kg/3 cm phosphate fertilizer, 7.5 g/3 cm magnesium fertilizer and 1.5 g/3 cm boron fertilizer could improve the soil physical and chemical properties, and promote the DBH growth of young *P. yunnanensis* forest.

Key words: *Pinus yunnanensis*; uniformity trial; fertilization; pine needles; soil physical and chemical properties

云南松 (*Pinus yunnanensis*) 为松科 (Pinaceae) 松属常绿针叶大乔木, 是西南特有的用材树种, 在云南社会经济和环境可持续发展中具有其它树种不可替代的作用^[1]。植物生长所需要的水分由土壤提供, 酸碱度和含水量是研究土壤质量的重要指标^[2-3]。施肥可改善土壤理化性质、调节酸碱度, 为植物的生长提供养分并促进林木速生。土壤的化学性状影响根的分布进而影响林木的生长, 尤其氮 (N)、磷 (P) 和钾 (K) 与之紧密相关。酸碱度影响营养物质的存在状态、微生物的活性、土壤的透气性及肥料的有效利用^[4-7]。

氮、磷和钾是植物生长必需的三大元素, 施入含此三类元素的肥料可改善林分的土壤特性。目前, 已有相关的研究表明, 不同肥料配施改善柚木 (*Tectona grandis*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 和泡桐 (*Paulownia fortunei*) 人工林土壤氮磷钾含量和 pH 值, 进一步促进林木生长^[8-11]。施肥是人工林培育的重要措施之一, 科学合理的施肥促进林木的生长。樟树 (*Cinnamomum camphora*)、湿地松 (*P. elliotii*)、思茅松 (*P. elliotii*)、南方红豆杉 (*Taxus wallichiana*) 和墨西哥柏 (*Cupressus lusitanica*) 等人工林试验表明, 施肥可促进胸径生长, 对林分生长有积极的促进作用^[12-16]。

本研究采用 $U_{15}(15^7)$ 均匀设计开展复合肥、氮肥、磷肥、镁肥和硼肥配施的试验, 施肥 2 a 后测定松针和土壤含水率、pH 值、总氮磷钾和速效氮磷钾含量, 了解施肥对云南松人工林土壤理化特性及林木针叶养分的影响, 丰富云南松人工林施肥的土

壤及针叶养分相关资料, 为云南松人工林施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地和林分概况

研究地位于昆明市宜良县禄丰村林场尖山林区, 地理位置为 103°09'54.7"E, 24°33'70.7"N, 海拔 1 970~2 100 m, 亚热带季风气候, 常年多西南季风。属云南松中心分布区, 年平均及最高和最低气温分别为 17.5、31.5 和 -5℃, 年平均降雨量约 995.3 mm, 蒸发量约 1 710.9 mm, 相对湿度约 68%。土壤属风化程度高的酸性红壤, 弱酸性的沉积岩或河流沉积物堆积成土母质发育形成的山原红壤^[17-18]。试验林分为 8 年生人工林, 采用 1 m×2 m×4 m 的非均匀密度 (初始密度 3 334 株/hm²) 造林。施肥前, 林分经过 1 次修枝和疏伐, 密度降低至 2 211 株/hm²。

1.2 研究方法

试验因素包括复合肥 (N:P:K=15:39:8)、氮肥 (尿素, 含 N≥46.4%)、磷肥 (CaP₂H₄O₈)、镁肥 (含 Mg≥98%) 和硼肥 (含 B=98%) 5 因素, 每因素 5 水平 (表 1)。根据因素水平, 采用 $U_{15}(15^7)$ 均匀设计开展试验。采用样本代重复进行统计分析。

施肥前对选好的林木开展每木检尺 (胸径和树高), 根据胸径逐株计算施肥量。施肥后 2 a 时, 每一处理组合 (包括不施肥的对照) 随机选取 3 株林木, 在选取的林木冠幅下, 以及周边林窗下设置 3 个土壤采样点, 清理枯落物和土壤腐殖质层, 开挖土壤剖面。采用环刀取土样。将土壤组成混合土样, 用

表 1 试验的因素及水平

Tab. 1 Factors and levels of the trial

水平	A-复合肥	B-尿素	C-磷肥	D-镁肥	E-硼肥
	/(kg · 3 cm ⁻¹)			/(g · 3 cm ⁻¹)	
1	0.80	0.20	0.10	0.00	2.50
2	1.60	0.25	0.20	2.50	3.00
3	0.00	0.00	0.30	5.00	3.50
4	0.20	0.10	0.40	7.50	1.50
5	0.40	0.15	0.00	10.00	2.00

注:表中 kg/3 cm 指按每 3 cm 胸径作为单位计算施肥量;横杠前字母 A~E 为因素代码。

四分法取混合土,及时称量土壤重量后装入自封袋带回实验室。共计 15 个土样,自然风干后称取干重。

选择同样的林木,在阳面的中上部采集针叶,3 株林木的针叶混合为一个样品,共 15 个针叶样品,装入自封袋中,带回实验室测定相关指标。对土壤样品 pH 值采用电位法测定;分别采用奈氏比色法、钒钼黄比色法和火焰光度计法测定针叶的全氮(TN)、磷(TP)和钾(TK);土壤速效氮(AN)、磷(AP)和钾(AK)分别用碱解扩散法、1/2 H₂SO₄法和火焰光度计法测定^[19]。对数据采用 SPSS 软件进行分析,采用 Duncan's 和 Person 法分别进行多重比较和相关分析。

2 结果与分析

2.1 施肥对松针性状和养分的影响

2.1.1 施肥水平组合对松针性状和养分的影响

处理组合的针叶长和烘干含水率分别为 23.90~27.34 cm 和 55.47%~60.88%,对照的则为 24.14 cm 和 60.75%,施肥对此 2 指标无显著的差异影响($P_{\text{针}}=0.546$ 、 $P_{\text{含}}=0.205 > 0.05$);处理组合的 TN、TP 和 TK 分别为 0.17%~0.57%、0.13%~0.33%和 0.17%~0.82%,对照的则为 0.35%、0.17%和 0.29%;处理组合间 TP 和 TK 呈现显著的差异($P_{\text{磷}}=0.025$, $P_{\text{钾}}=0.047 < 0.05$),除处理组合 13(复合肥 0.8 kg/3 cm、氮肥 0.1 kg/3 cm、磷肥 0.2 kg/3 cm、镁肥 10.0 g/3 cm、硼肥 2.5 g/3 cm)和 14(复合肥 1.6 kg/3 cm、氮肥 0.2 kg/3 cm、镁肥 7.5 g/3 cm、硼肥 2.5 g/3 cm)外,其余的 TP 均高于对照;除处理组合 3(复合肥 0.4 kg/3 cm、氮肥 0.25 kg/3 cm、磷肥 0.4 kg/3 cm、硼肥 2.0 g/3 cm)和 8(磷肥 0.30 kg/3 cm、镁肥 5.00 g/3 cm、硼肥 3.50 g/3 cm)外,其余的 TK 均大

于对照的(表 2)。试验结果揭示,复合肥和微量元素配施能极显著促进云南松幼林松针养分含量增长,多数处理组合呈现养分 3 要素增加的现象。

表 2 处理组合的松针理化性质

Tab. 2 Physical and chemical properties of pine needles

处理组合	TN/%	TP/%	TK/%	针叶长/cm	含水率/%
1	0.32±0.07	0.25±0.07ab	0.43±0.06b	25.78±0.27	59.02±0.85
2	0.27±0.06	0.31±0.07a	0.63±0.07ab	26.92±0.82	59.44±0.36
3	0.40±0.03	0.18±0.05b	0.17±0.03c	27.27±1.58	58.78±0.99
4	0.33±0.08	0.19±0.01b	0.43±0.14b	27.34±1.88	59.40±0.79
5	0.31±0.07	0.25±0.02ab	0.54±0.11b	23.90±1.66	59.89±1.24
6	0.19±0.01	0.28±0.05ab	0.82±0.01a	24.93±0.81	59.79±1.05
7	0.39±0.10	0.25±0.02ab	0.61±0.19ab	24.33±0.55	58.75±1.01
8	0.42±0.12	0.15±0.03bc	0.26±0.10bc	24.81±1.14	60.25±0.25
9	0.36±0.09	0.23±0.01ab	0.34±0.14bc	26.71±1.08	58.76±1.04
10	0.38±0.02	0.24±0.08ab	0.30±0.12bc	26.63±2.18	59.00±1.12
11	0.57±0.19	0.33±0.02a	0.33±0.20bc	25.44±0.94	55.47±1.90
12	0.30±0.06	0.20±0.00b	0.66±0.09ab	25.44±0.98	60.43±1.79
13	0.17±0.01	0.13±0.01c	0.36±0.11bc	25.83±1.11	59.49±0.57
14	0.41±0.02	0.15±0.00bc	0.42±0.01b	27.34±1.31	60.88±0.30
15	0.29±0.06	0.19±0.02b	0.52±0.18b	25.06±1.00	59.23±1.30
16(ck)	0.35±0.11	0.17±0.03bc	0.29±0.17bc	24.14±0.68	60.75±0.98

注:大写字母为 0.01 水平的差异显著,小写字母为 0.05 水平的差异显著(下同)。

2.1.2 影响松针养分含量的主导因子及其优水平组合

影响 TN 含量的主导因子是氮肥,影响 TP 和 TK 的则是磷肥;置信区间 90%时,TP 的 B、C 和 E 因素的水平间具有显著的差异($P_{\text{氮、磷、钾}}=0.063$ 、 0.086 和 $0.056 < 0.10$),其中 B₅(氮肥 0.15 kg/3 cm)的 TP 显著地高于其余 4 个水平,E₂(硼肥 3.00 g/3 cm)的 TP 显著地高于 E₁(硼肥 2.50 g/3 cm)的;

影响 TN 和 TP 的理论优水平组合为 $A_3B_5C_5D_3E_2$, 与实际最高的处理组合 11($A_3B_5C_1D_3E_2$) 仅 C 因素不一致,但 $C_5(0.00 \text{ kg}/3 \text{ cm})$ 和 $C_1(0.10 \text{ kg}/3 \text{ cm})$ 是相邻水平,不一致或许是因素水平间具有交互作用所致;TK 的理论优组合为 $A_4B_4C_2D_2E_4$,与实际增

长率最高的处理组合 6($A_5B_4C_2D_1E_4$) 因素 A 和 D 不一致(表 2、表 3)。因宜良尖山林区的土壤特性是缺氮,适宜的氮肥能提高云南松松针的全氮含量;不施磷肥时 TP 含量最高,也许是因为复合肥中的磷肥即可满足松针养分含量的需求所致。

表 3 松针养分含量的极差分析
Tab. 3 Range analysis of nutrient content in pine needles

水平	TN					TP					TK				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	0.31	0.37	0.34	0.32	0.29	0.21	0.21b	0.23ab	0.23	0.16b	0.42	0.53	0.53	0.44	0.43
2	0.35	0.36	0.30	0.28	0.41	0.20	0.21b	0.23ab	0.23	0.26a	0.43	0.37	0.55	0.60	0.43
3	0.43	0.34	0.34	0.43	0.39	0.24	0.20b	0.20ab	0.24	0.21ab	0.38	0.40	0.40	0.38	0.40
4	0.28	0.23	0.29	0.35	0.28	0.23	0.20b	0.16b	0.20	0.24ab	0.60	0.54	0.26	0.43	0.60
5	0.32	0.40	0.41	0.31	0.33	0.23	0.29a	0.27a	0.21	0.25ab	0.44	0.44	0.46	0.42	0.41
R	0.15	0.17	0.12	0.15	0.13	0.04	0.09	0.11	0.04	0.10	0.22	0.17	0.29	0.22	0.20
主次因子	B > A = D > E > C					C > E > B > A = D					C > A = D > E > B				
优水平组合	$A_3B_5C_5D_3E_2$					$A_3B_5C_5D_3E_2$					$A_4B_4C_2D_2E_4$				

2.2 施肥对土壤养分的影响

2.2.1 土壤 pH 和含水率及速效氮磷钾对施肥的响应

处理组合的 pH 和含水率分别为 4.08~4.69 和 17.27%~34.59%,对照的则为 4.42 和 17.27%,处理组合 9(复合肥 0.4 kg/3 cm、氮肥 0.15 kg/3 cm、磷肥 0.1 kg/3 cm,硼肥 3.5 g/3 cm)的 pH 值极显著地高于 5 和对照的,施肥处理组合的含水率均高于对照的($P \approx 0.000 < 0.01$),即复合肥和微量元素配施可改善土壤环境。15 个处理组合的土壤 AN、AP、AK 和胸径增长率分别为 22.77~41.91、7.70~11.80、66.44~174.67 mg/kg 和 23.5%~50.3%,对照的则为 23.7、8.23 和 81.11 mg/kg 和 22.4%;处理组合间 AP 和 AK 具有极显著的差异($P \approx 0.000 < 0.01$)。除处理组合 5 外,其余施肥处理的 AN 和 AP 均高于对照的。15 个处理组合的胸径增长率极显著地高于对照的(表 4)。表明施肥极显著地增加土壤 AN、AP 和 AK 的含量,进一步促进林木胸径生长,且处理组合 4(复合肥 1.6 kg/3 cm、氮肥 0.10 kg/3 cm、磷肥 0.2 kg/3 cm,镁肥 7.5 g/3 cm,硼肥 1.5 g/3 cm)的效果最优。

2.2.2 指标对因素水平的响应

影响土壤 pH 和胸径增长率的主导因子是硼肥,pH 仅 E 因素水平间具有极显著的差异($P_E \approx$

$0.000 < 0.01$),理论优水平组合为 $A_1B_5C_5D_5E_1$;胸径增长率因素水平间都具有极显著的差异($P \approx 0.000 < 0.01$),理论优组合为 $A_2B_3C_3D_4E_4$;影响 AN、AP、AK 和含水率的主导因子均是复合肥和镁肥,AN 仅因素 A 和 D 具有显著差异($P_A = P_D = 0.035 < 0.05$),理论优组合为 $A_2B_2C_2D_4E_2$;影响 AP 的因素 A、D 和 E 具有极显著差异($P \approx 0.000 < 0.01$),理论优组合为 $A_4B_2C_2D_2E_2$;影响 AK 的因素 A、C、D 和 E 具有极显著差异($P \approx 0.000 < 0.01$),因素 B 具有显著差异($P = 0.02 < 0.05$),理论优组合为($A_5B_4C_2D_1E_4$),与实际 AK 最大的处理组合 6 完全一致,其余的理论优组合均与实际最大的不一致(表 5)。以上试验结果中,影响有效氮磷钾的均不是氮肥和磷肥,而是复合肥和镁肥,或许是复合肥中的氮和磷元素即可满足土壤对有效氮磷钾的需求;理论最优和实际最高的不一致,也许是因素间具有交互作用导致。

2.3 指标间的相关性分析

相关性分析(表 6)表明,针叶长与土壤 pH($P = 0.01 < 0.05$)和 B 因素($P = 0.049 < 0.05$)呈显著负相关,即土壤越偏酸越能促进针叶伸长;增加氮肥能提高土壤 pH,从而抑制针叶长。针叶含水率、TN、TP 和 TK 与所有指标和因素水平间未呈现显著差异($P > 0.05$),揭示这些指标受施肥的影响较小。

表 4 处理组合的土壤养分含量和胸径增长率
Tab. 4 Soil nutrient content and DBH growth rate of treatments

处理组合	pH	含水率/%	AN/(mg · kg ⁻¹)	AP/(mg · kg ⁻¹)	AK/(mg · kg ⁻¹)	胸径增长率/%
1	4.21 ± 0.02BC	17.41 ± 0.58C	37.24 ± 6.42	8.50 ± 0.19B	145.00 ± 0.38AB	44.0 ± 4.0A
2	4.09 ± 0.03C	21.12 ± 0.58AB	27.91 ± 0.93	8.57 ± 0.59B	125.11 ± 1.60B	33.8 ± 3.4AB
3	4.16 ± 0.01BC	23.70 ± 1.15AB	27.91 ± 2.60	8.17 ± 0.12C	144.89 ± 1.64AB	31.9 ± 2.4AB
4	4.13 ± 0.01BC	21.20 ± 0.57AB	33.97 ± 4.74	8.34 ± 0.30B	162.22 ± 0.62A	50.3 ± 4.5A
5	4.08 ± 0.02C	19.79 ± 1.15BC	22.77 ± 3.27	7.70 ± 0.20C	96.11 ± 0.78B	37.4 ± 4.0AB
6	4.25 ± 0.05BC	30.10 ± 1.53A	30.24 ± 4.28	8.55 ± 0.09B	174.67 ± 1.07A	34.6 ± 2.5AB
7	4.39 ± 0.07B	19.15 ± 0.58BC	34.44 ± 4.28	7.90 ± 0.18C	66.44 ± 1.75C	27.7 ± 2.4B
8	4.53 ± 0.04B	20.92 ± 0.49AB	29.31 ± 3.65	7.95 ± 0.37C	96.44 ± 0.91B	37.0 ± 4.0AB
9	4.69 ± 0.04A	23.21 ± 0.48AB	36.31 ± 4.15	7.89 ± 0.13C	121.89 ± 2.39B	24.6 ± 2.3B
10	4.55 ± 0.03B	20.43 ± 0.54B	41.91 ± 2.60	8.24 ± 0.21C	154.67 ± 0.92AB	28.0 ± 3.4B
11	4.59 ± 0.01AB	19.84 ± 0.32BC	30.24 ± 6.42	9.79 ± 0.18AB	88.89 ± 1.42BC	26.2 ± 2.3B
12	4.55 ± 0.03B	17.87 ± 0.51BC	31.17 ± 2.60	11.80 ± 0.26A	75.44 ± 0.29C	23.5 ± 1.7C
13	4.60 ± 0.01AB	18.48 ± 0.28BC	31.64 ± 3.52	9.55 ± 0.23AB	83.44 ± 0.89BC	28.5 ± 2.3B
14	4.58 ± 0.03AB	19.87 ± 0.18BC	37.71 ± 3.06	8.74 ± 0.29AB	109.33 ± 0.51B	27.6 ± 3.0B
15	4.57 ± 0.01AB	34.58 ± 0.48A	30.71 ± 3.82	11.05 ± 0.37A	77.89 ± 0.40C	33.8 ± 5.3AB
16(ck)	4.42 ± 0.01B	17.27 ± 0.60C	23.71 ± 2.60	8.23 ± 0.42C	81.11 ± 0.29BC	22.4 ± 2.4C

表 5 土壤各指标的极差分析
Tab. 5 Range analysis of soil indexes

水平	pH					AN/(mg · kg ⁻¹)					胸径增长率/%				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	4.51	4.35	4.33	4.37	4.59A	36.00a	31.64	32.81	31.48ab	33.35	28.06B	30.92AB	28.18B	30.34B	29.99B
2	4.31	4.42	4.37	4.40	4.56A	36.31a	33.66	34.32	29.93ab	34.44	40.65A	27.80B	37.79A	30.38B	25.89B
3	4.40	4.44	4.44	4.40	4.54A	27.44b	32.42	32.42	27.44b	33.35	33.54AB	38.29A	38.29A	33.54AB	29.77B
4	4.40	4.33	4.38	4.31	4.15B	29.93ab	31.95	29.77	36.31a	29.00	30.38B	37.79A	27.80B	40.65A	40.75A
5	4.37	4.46	4.45	4.51	4.16B	31.48ab	31.48	30.94	36.00a	31.02	30.34B	28.18B	30.92AB	28.06B	36.58A
R	0.20	0.13	0.12	0.20	0.44	8.87	2.18	4.55	8.87	5.44	12.59	10.49	10.49	12.59	14.86
主次因子	E > A = D > B > C					A = D > E > C > B					E > A = D > B = C				
优组合	A ₁ B ₅ C ₅ D ₅ E ₁					A ₂ B ₂ C ₂ D ₄ E ₂					A ₂ B ₃ C ₃ D ₄ E ₄				
水平	AP/(mg · kg ⁻¹)					AK/(mg · kg ⁻¹)					含水率 MC/%				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	8.56B	8.11	8.66	8.20B	9.78A	101.52B	90.63b	117.22AB	147.15A	90.22B	19.35B	19.60	20.49	25.67A	24.31
2	8.53B	9.41	9.23	10.47A	9.95A	138.85A	125.00ab	141.75A	92.81B	106.33B	19.50B	20.67	22.40	24.52AB	19.38
3	8.48B	9.16	9.16	8.48B	7.91B	93.81B	106.44b	106.44AB	93.81B	94.93B	20.18B	24.31	24.31	20.18B	21.09
4	10.47A	8.81	8.86	8.53B	8.20B	92.81B	140.11a	114.17AB	138.85A	144.33A	24.52AB	23.26	21.09	19.50Bb	23.70
5	8.20B	8.75	8.32	8.56B	8.41B	147.15A	111.96ab	93.33B	101.52B	138.33AB	25.67A	21.39	20.50	19.35Bb	20.74
R	2.27	1.30	0.91	2.27	2.04	54.34	49.48	48.42	54.34	54.11	6.32	4.71	3.82	6.32	4.93
主次因子	A = D > E > B > C					A = D > E > B > C					A = D > E > B > C				
优组合	A ₄ B ₂ C ₂ D ₂ E ₂					A ₅ B ₄ C ₂ D ₁ E ₄					A ₅ B ₃ C ₃ D ₁ E ₁				

表 6 指标和因素间的相关性分析
Tab. 6 Correlation analysis between indicators and factors

相关指标	针叶长				土壤					胸径 增长率	因素				
	含水率	TN	TP	TK	含水率	pH	AN	AP	AK		A	B	C	D	E
针叶 针叶长	-0.071	-0.028	-0.036	0.030	0.078	-0.367*	-0.223	-0.193	0.041	0.144	-0.027	-0.295*	-0.153	0.027	0.154
含水率	1	-0.155	-0.119	-0.176	0.017	0.180	-0.040	0.031	0.189	-0.077	0.008	0.223	-0.160	-0.008	-0.039
TN		1	0.001	-0.185	-0.136	0.155	0.194	-0.133	-0.098	-0.067	-0.054	-0.060	0.194	0.054	-0.041
TP			1	0.193	0.053	-0.191	0.063	0.023	0.170	0.081	0.158	0.266	0.096	-0.158	0.292
TK				1	0.234	-0.237	0.063	0.180	0.015	0.255	0.130	-0.009	-0.208	-0.130	0.075
土壤 含水率					1	0.010	-0.006	0.191	0.208	0.062	0.538**	0.188	-0.093	-0.538**	-0.086
pH						1	0.209	0.378**	-0.451**	-0.418**	-0.133	0.078	0.146	0.133	-0.830**
AN							1	-0.023	0.219	-0.094	-0.298*	-0.039	-0.168	0.298*	-0.196
AP								1	-0.377**	-0.213	0.141	0.079	-0.193	-0.141	-0.517**
AK									1	0.166	0.190	0.242	-0.408**	-0.190	0.563**
胸径 增长率										1	0.051	0.080	0.082	-0.051	0.350*
因素 A											1	0.333*	0	-1.000**	0.333*
B												1	0	-0.333*	0.133
C													1	0.000	0.000
D														1	-0.333*

注: * 表示指标间显著相关($P < 0.05$), ** 表示指标间极显著相关($P < 0.01$)。

土壤含水率与因素 A 和 D 分别呈极显著正相关和负相关($P \approx 0.000 < 0.01$), 即施复合肥可增加含水率, 但镁肥又会产生抑制作用; pH 与 AP 呈极显著正相关($P = 0.008 < 0.01$), 即土壤越偏碱 AP 含量越高, 同时与 AK ($P = 0.001 < 0.01$)、胸径增长率 ($P = 0.003 < 0.01$) 和因素 E ($P \approx 0.000 < 0.01$) 呈极显著负相关; 施硼肥会降低土壤 pH, 增加土壤 AK 含量。与含水率不同, AN 与因素 A 和 D 分别呈显著负相关和正相关 ($P = 0.047 < 0.05$), 减少复合肥或增加镁肥可提高 AN 含量; AP 与 AK ($P = 0.008 < 0.01$) 和因素 E ($P \approx 0.000 < 0.01$) 分别呈极显著负相关和正相关, 增加硼肥可提高 AP 含量或降低 AK 含量; AK 与因素 C ($P = 0.005 < 0.01$) 和 E ($P \approx 0.000 < 0.01$) 分别呈极显著负相关和正相关, 减少磷肥或增加硼肥可提高 AK 含量。

胸径增长率与 pH 呈极显著负相关, 也许土壤中的养分通过改变其 pH 而影响林木生长, 同时与 E 因素呈显著正相关 ($P = 0.018 < 0.05$), 即硼肥促进胸径生长。这与施肥显著促进云南松胸径增长的结果相符合, 验证了硼肥为影响胸径增长率的主导因子。根据极差分析的主次因子排序, 结合相关分析中的指标和因素间相关性, 该林分施复合肥和镁肥可改善土壤养分含量, 施硼肥则改变土壤 pH, 进一步促进胸径生长。

3 讨论与结论

沈松等^[8]指出, 复合肥和尿素等肥料配施的柚木胸径增长率与土壤全钾和氮含量呈正相关, 土壤施肥促进柚木生长; 廖承锐等^[10]研究杉木施肥对土壤养分及林木生长的影响, 结果表明, 施 500 g/株复合肥林地的土壤有效磷和钾含量比未施肥的高 6.01% 和 37.36%, 林分平均胸径比未施肥的高 7.27%。本试验施复合肥能促进速效磷和钾含量增加, 利于林木胸径生长结果与其一致, 即氮磷钾肥配施对土壤养分含量产生显著的积极影响。本研究中, 复合肥和微量元素配施的土壤有效氮和磷高于未施肥的, 与郭玉文等^[20]和胡诚等^[21]氮磷钾配施提高土壤养分含量结果类似, 揭示氮磷钾配施的重要性。谢国阳等^[22]研究表明, 氮磷钾配施可提高杉木针叶的单叶面积并促进针叶生长, 这也与本试验中结果一致, 即配施复合肥和微量元素可改善林木针叶养分含量以及利于针叶生长, 进一步利于林分生长。陈家法等^[13]研究表明, 施肥对促进湿地松胸径生长效果显著, 本试验结果与其一致, 表明氮磷钾配施可促进林木生长, 提高经济效益。

潘一峰等^[9]施石灰和复合肥对柚木人工林进行土壤改良, 结果使酸性土壤得到改良的同时 pH 值提高, 从而促进林木生长。但本试验与其相悖, 胸径增长率与土壤 pH 值呈极显著的负相关, 即 pH 值

越高,对胸径生长反而产生抑制作用,可能是不同的树种对土壤 pH 值要求不同导致。本研究对照的有效钾含量不是最低,原因也许是尖山林区的土壤富钾,增施钾肥对其影响较小,这有待进一步试验研究。

综合分析,土壤理化性质与肥料种类具有复杂的相关性。结合不同肥料种类对云南松松针养分含量和土壤理化性质的影响,在所有施肥处理中,镁肥和硼肥对 AN 和胸径增长率呈现显著的正相关。建议对云南松幼林施肥时采用复合肥和微量元素配施,复合肥 1.6 kg/3 cm、氮肥 0.10 kg/3 cm、磷肥 0.2 kg/3 cm、镁肥 7.5 g/3 cm、硼肥 1.5 g/3 cm 的组合可改善土壤理化性质,促进云南松林木的胸径生长,进而提高林分的蓄积量。

参考文献:

- [1] 杨永洁,张青青,李莲芳,等. 激素和基质及缓释肥对云南松苗木生长的影响[J]. 东北林业大学学报,2020,48(8):6-10.
- [2] 王勤,孙孟瑶,遆建航,等. 垦复结合施肥对毛竹林生长及土壤理化特性的影响[J]. 西北林学院学报,2020,35(4):13-17.
- [3] 杨红,徐唱唱,赛曼,等. 不同土地利用方式对土壤含水量、pH 值及电导率的影响[J]. 浙江农业学报,2016,28(11):1922-1927.
- [4] 张平,洪坚平,乔志伟,等. 不同施肥处理对复垦土壤生物活性的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2015,35(6):577-581,596.
- [5] 吴昊,董思谨,王文浩. 秦岭山地松栎林土壤理化性质耦合关系[J]. 中南林业科技大学学报,2020,40(10):117-126.
- [6] CHENG Y, WANG J, MARY B, et al. Soil pH has contrasting effects on gross and net nitrogen mineralizations in adjacent forest and grassland soils in central Alberta, Canada [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 848-857.
- [7] 付晓凤,朱原,黄杰,等. 氮磷钾配比施肥对扁桃幼苗生长及叶片养分含量的影响[J]. 四川农业大学学报,2019,37(5):629-635.
- [8] 沈松,吴俊多,李莲芳,等. 施肥对柚木目标树土壤理化性质及其胸径生长的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2020,40(4):38-46.
- [9] 潘一峰,刘文明. 酸性土壤改良对不同种源的柚木生长的影响[J]. 热带亚热带土壤科学,1997(1):9-14.
- [10] 廖承锐,周哲名,苏治南,等. 间伐与施肥对柳杉近熟林土壤养分及林木生长的影响[J]. 广东农业科学,2014,41(12):59-62.
- [11] 李鹏. 泡桐人工林养分吸收分配规律与土壤养分特征研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2019.
- [12] 刘新亮,刘蕾,何小三,等. 施肥和修枝对材用樟树幼林生长的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2020,40(12):54-59.
- [13] 陈家法,魏志恒,吴际友,等. 湿地松中龄林施肥经济效益与最优施肥量研究[J]. 中南林业科技大学学报,2020,40(10):28-34.
- [14] 苏俊武,槐可跃,刘永刚,等. 不同施肥方式对山地思茅松幼林生长的影响[J]. 西部林业科学,2019,48(5):37-42.
- [15] 卢艺,李瑞瑞,王益明,等. 氮素添加对墨西哥柏人工林生长和生理特性的影响[J]. 西部林业科学,2019,48(4):94-100.
- [16] 简荣林. 不同施肥技术对南方红豆杉幼林生长量的影响[J]. 林业资源管理,2007(6):61-63.
- [17] 彭超,李莲芳,王慷林,等. 宜良禄丰村林场云南松天然更新分析[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(11):42-46.
- [18] 杨历雨,王慷林,李莲芳,等. 云南松人工林不同等级目标树生长分析[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2020,41(5):119-124.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [20] 郭玉文,李贻铨,宋菲. 不同产区杉木幼林施肥效应及主要影响因子[J]. 植物营养与肥料学报,2000(1):91-97.
- [21] 胡诚,宋家咏,李晶,等. 长期定位施肥土壤有效磷与速效钾的剖面分布及对作物产量的影响[J]. 生态环境学报,2012,21(4):673-676.
- [22] 谢国阳,林思祖,张文富,等. 不同施肥处理对杉木针叶生理特性的影响[J]. 浙江林学院学报,1999(2):3-5.

责任编辑:刘平书