

王雪, 汪梦婷, 杨振欣, 等. 云南松苗木萌蘖能力对氮、磷配施的响应规律 [J]. 福建农业学报, 2023, 38 (1): 39-46.
WANG X, WANG M T, YANG Z X, et al. Sprouting of *Pinus yunnanensis* Seedlings in Response to N/P Application [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 38 (1): 39-46.

云南松苗木萌蘖能力对氮、磷配施的响应规律

王 雪^{1,2}, 汪梦婷³, 杨振欣^{1,2}, 罗 茜^{1,2}, 陈 林^{1,2}, 唐军荣^{1,2},
陈 诗^{1,2}, 蔡年辉^{1,2}, 许玉兰^{1,2*}, 王德新^{1,2*}

(1. 西南林业大学/西南地区生物多样性保育国家林业局重点实验室, 云南 昆明 650224; 2. 西南林业大学/西南山地森林资源保育与利用教育部重点实验室, 云南 昆明 650224; 3. 云南省昆明市西山区团结街道农林水与应急服务中心, 云南 昆明 650118)

摘 要:【目的】以 1 年生平茬后的云南松苗木为材料, 研究不同氮、磷配施对云南松苗木的萌蘖能力的影响, 并筛选最佳的氮磷配施用量。【方法】以 1 年生云南松苗木为研究对象, 采用 2 因素 3 水平 3×3 回归设计, 研究云南松苗木平茬后土壤氮、磷配施对云南松苗木萌蘖能力的影响。【结果】云南松苗木平茬后的萌蘖数量符合 Logistic 增长过程并不受氮、磷配施的影响; 施用氮、磷肥可促进云南松苗木的萌蘖能力, 可影响苗木第二次萌蘖的时间和高峰, 且苗木萌蘖数量配施效果较单施好; 云南松苗木萌蘖数量对氮、磷配施的响应规律符合二元二次回归方程, 在施氮肥 0.29 g·株⁻¹、磷肥 1.02 g·株⁻¹ 时, 苗木的萌蘖数量达到最大; 施用氮、磷肥可促进云南松苗木潜在萌条和有效萌条生长, 潜在萌条单施且单施磷肥效果比配施效果好, 有效萌条在 0.4、0.8 g·株⁻¹ 的氮磷配合施用时效果更佳。【结论】氮磷配施比单施更利于萌蘖数量的增加, 高磷处理有利于潜在萌条的生长, 中等浓度的氮磷配合施用更有利于有效萌条的生长。

关键词: 云南松; 平茬; 氮、磷配施; 萌蘖能力

中图分类号: S 791.257 文献标志码: A 文章编号: 1008-0384 (2023) 01-0039-08

Sprouting of *Pinus yunnanensis* Seedlings in Response to N/P Application

WANG Xue^{1,2}, WANG Mengting³, YANG Zhenxin^{1,2}, LUO Xi^{1,2}, CHEN Lin^{1,2}, TANG Junrong^{1,2},
CHEN Shi^{1,2}, CAI Nianhui^{1,2}, XU Yulan^{1,2*}, WANG Dexin^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Biodiversity Conservation in Southwest China, State Forestry Administration, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China; 2. Key Laboratory for Forest Resources Conservation and Utilization in the Southwest Mountains of China, Ministry of Education, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China; 3. Agriculture, Forestry, Water and Emergency Service Center, Tuanjie Street, Xishan District, Kunming, Yunnan 650118, China)

Abstract: 【Objective】Effect of N and P fertilization on the sprouting of *Pinus yunnanensis* seedlings was studied. 【Methods】One-year-old *P. yunnanensis* seedlings after coppicing were used in a two-factors-three-levels 3×3 regression experimentation to optimize the fertilization. 【Results】The number of sprouts emerged from the seedlings after coppicing followed the logistic growth pattern independent of N/P application. However, the fertilization promoted the sprouting, altered the time and peak of second sprouting, and increased the sprout count more than when N or P was applied alone. The tillers responded to the N/P application in a binary quadratic regression function to reach the highest count with the input of 0.29 g of N and 1.02 g of P per plant. The combined N/P application enhanced the growth of both potential and effective sprouts on the seedlings, especially, on the effective sprouts, the best result was to use N at 0.4 g and P at 0.8 g·plant⁻¹. On the other hand, application of N or P alone exerted a greater effect than the combined one on the potential sprouts. 【Conclusion】Combined N/P fertilization was more conducive to the increase of the number of sprouts on the seedlings than N or P fertilizer was applied

收稿日期: 2022-07-06 初稿; 2022-09-17 修改稿

作者简介: 王雪 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事林木遗传育种研究 (E-mail: 1334091850@qq.com)

* 通信作者: 许玉兰 (1979-), 女, 教授, 主要从事林木遗传育种研究 (E-mail: xvyulan@163.com); 王德新 (1983-), 男, 讲师, 主要从事林木遗传育种研究 (E-mail: woshixin2007@126.com)

基金项目: 云南省万人计划青年拔尖人才项目 (YNWR-QNBJ-2019-075); 国家自然科学基金 (31860203); 云南省研究生导师团队建设项目 (2022-97); 西南林业大学第一批预研基金 (01108-18200133)

alone. Although high P fertilization benefitted the growth of potential sprouts, when combined with N the application at a medium concentration encouraged the growth of effective sprouts.

Key words: *Pinus yunnanensis* Franch; coppicing; N/P fertilization; sprouting ability

0 引言

【研究意义】云南松 (*Pinus yunnanensis*) 为松科 (Pinaceae) 松属 (*Pinus*) 的常绿针叶高大乔木。在东经 96°~108°、北纬 23°~30°，海拔 700~3 200 m 的地区均有大面积分布，是西南山地的特有树种。云南松喜光、适应性强，能耐冬春干旱气候及瘠薄土壤，是重要的用材树种和荒山造林的先锋树种，在我国西南地区被广泛用于人工造林^[1-2]。在造林初期云南松苗木生长缓慢，严重制约了云南松的经济效益和生态效益^[3]。在木本植物的休眠期，可以将苗木从地面以上剪平，以刺激顶部芽的生长、培养优质苗木，这项技术措施称为平茬^[4]。但在云南松苗木平茬后，其萌蘖能力较弱，使得优良无性繁殖材料的获得受限。因此，探讨不同氮磷施用对云南松生长的影响，对提高云南松的培育能力具有重要意义。【前人研究进展】施肥可提高土壤肥力，在一定程度上促进植物的生长发育，是目前苗木生产管理中较为重要的措施。氮、磷作为重要的植物营养元素，可有效促进植物生长发育^[5]。李洪娜等^[6]对矮化富士苹果幼树进行施氮肥试验研究发现，氮肥能使植株生物量有明显的提高，而且能促进细根生长，延缓树势衰老，促进成花。多数研究表明，混合施肥比单一施肥效果显著^[7]。左永忠等^[8]通过对毛白杨、小黑杨、白杨进行施肥试验发现，两者合理搭配、混施能够显著促进苗木苗高和地径的生长。同样在云南松施肥试验中也发现，较高的氮肥比例有利于促进树干的粗生长和根系发育，较高的磷肥比例有利于促进树干的高生长和各构件生物量的积累^[9]。整体来看，氮、磷配比比单施氮肥、磷肥更利于萌蘖能力的提高^[10]。【本研究切入点】云南松平茬后，其萌蘖数量和生长速度均有待提高，如何解决云南松苗木平茬后萌蘖的问题，是当前亟须解决的生产问题。【拟解决的关键问题】以平茬后的云南松苗木为材料，对其土壤进行氮、磷配施，分析不同处理水平下对云南松苗木的萌蘖能力、萌蘖数量、潜在萌条、有效萌条的影响，并明确最佳的氮磷配施用量，为云南松苗木平茬萌蘖的培育奠定实践依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

试验地设置在西南林业大学苗圃，位于东经

102°45'41"，北纬 25°04'00"，海拔 1 945 m，该地年均气温 14.5 ℃，绝对最低气温 -9 ℃，绝对最高温 32.5 ℃，年降水量 700~1 100 mm，年平均相对湿度 68.2%，全年降水量在时间分布上，干湿分明，5~10 月是雨季，降水量占全年的 85% 左右，11 月至翌年 4 月是旱季，降水量占全年的 15% 左右。全年晴天较多，日照数年均 2 445.6 h，日照率 56%。全年无霜期较长，属于北亚热带半湿润高原季风气候，土壤为酸性低磷土壤^[11]。

1.2 试验材料

试验种子采自云南省弥渡县云南松无性系种子园，播种育苗，出苗后对其进行常规苗期管理。培育 1 年后，选择生长情况一致的苗木于 3 月底按同一高度 (6 cm) 平茬后，进行后续试验。试验所用的肥料为氮肥和磷肥。其中氮肥为尿素 (含氮量 46%)，磷肥为过磷酸钙 (P₂O₅ 含量 12%)。

1.3 研究方法

试验采用 2 因素 3 水平 3×3 回归设计，氮、磷 2 因素的 3 个水平各自两两组合，共组成 9 个处理。每个处理组合 42 株苗，3 次重复。氮、磷肥用量按张跃敏等^[12]的方法，选取高、中、低 3 个量，高为中的 2 倍、低为 0 (作为对照)，具体试验方案见表 1。按试验设计将肥料配成水溶液，平茬后，每 7 天喷 1 次在盆栽容器土壤中，共喷 5 次。田间布设以随机排列和拉丁方排列相结合进行优化布设，将育苗盆整齐摆放在苗床上，设置 3 次重复。苗木在管理措施上保持完全相同，适时浇水，除草松土。

表 1 云南松苗木氮磷配施试验方案

Table 1 Experimental design of N/P fertilization on *P. yunnanensis* seedlings

处理 Treatments	氮 Nitrogen/ (g·株 ⁻¹)	磷 Phosphorus/ (g·株 ⁻¹)
1	0	0
2	0	0.8
3	0	1.6
4	0.4	0
5	0.4	0.8
6	0.4	1.6
7	0.8	0
8	0.8	0.8
9	0.8	1.6

1.4 指标测定

试验布设后对云南松苗木的萌蘖能力进行跟踪

调查。即从 2019 年 4~12 月，于每个月月底统计萌蘖数量。在 2019 年 12 月底每个处理每个重复随机选取 12 株，每个处理 36 株，共 324 株，测定萌条长度，精确至 0.1 cm。

1.5 数据分析

1.5.1 数据的整理与分析 试验结束后，采用 Excel 2010 对萌蘖数量、每月净萌蘖数量、萌条长度进行统计整理。利用 DPS 7.05 分析软件进行模型构建，利用 SPSS 25.0 分析软件进行多重比较、线性回归分析，利用 OriginPro 2021 软件进行相关图表绘制。

1.5.2 萌蘖数量的动态变化 以苗木生长时间 t 为自变量，所调查的萌蘖数量 Y 为因变量，进行 Logistic 模型的拟合^[13]。

$$Y = k / (1 + e^{a-bt})$$

式中待测参数 (a, b, k) 运用麦夸算法在 DPS 7.05 分析软件中进行估算。其中 k 为萌蘖数量的理论极限值 (上限值或生长潜力)， a 与萌条初始值及萌蘖生长特征点出现的时间有关， b 为萌蘖速率参数。通过求导，即可得到曲线瞬时最大斜率对应的时间点 $t_0=a/b$ 。

1.5.3 回归模型的构建 试验结束后，选取萌条数、各构件生物量和各构件生物量分配比等作为调查指标，在 SPSS 软件中进行回归分析，得出各组回归方程的模型^[14]。

$$Y = a + bN + cP + dN^2 + eP^2 + fNP$$

式中： Y ——调查的指标 (萌条数)； a ——待定常数； $b、c、d、e、f$ ——待定系数； N ——氮的用量； P ——磷的用量； NP ——氮、磷交互作用项。

2 结果与分析

2.1 萌蘖数对施肥时间的响应

由图 1、表 2 中可以看出，不同处理云南松苗木

的萌蘖数量随时间变化采用 Logistics 拟合程度均达极显著水平 ($P=0.0001$)，且各处理拟合相关系数均在 0.9618~0.9906，可见云南松苗木的萌蘖数量可用 Logistics 方程进行描述。9 个处理的萌蘖数量增长趋势基本一致，在 4 月上旬增长缓慢，而 4 月下旬至 6 月上旬处于速生阶段，之后生长减缓，萌蘖数量增长不明显。其中处理 1 的速生点为 29 d，处理 2 的速生点为 25 d；处理 3 和处理 5 的速生点均为 27 d；处理 4 的速生点为 27 d；处理 6、7、8 和 9 的速生点均为 30 d，虽各处理间的速生点有所差异，但均在 4 月下旬达到速生点。由此表明，施氮、磷后云南松苗木的萌蘖数量随施肥时间的推移呈现“慢-快-慢”的生长趋势，符合“S”形曲线变化。

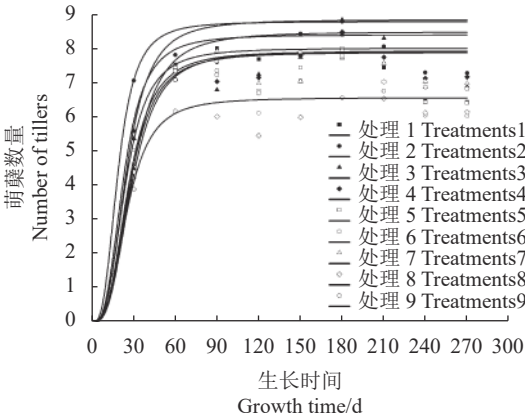


图 1 云南松苗木萌蘖数量随施肥时间的变化规律
Fig.1 Variation on sprout count of *P. yunnanensis* seedlings with fertilization time

如图 2 所示，不同施肥处理下云南松苗木的月萌蘖数量随施肥时间的变化均呈双峰曲线，其中每个处理的第一个萌蘖高峰均出现在施肥后 30 d 左右，即 4 月底至 5 月初，但不同处理下云南松苗木的第二次萌蘖高峰出现的时间则有所差异。其中处理 9 的第二个萌蘖高峰出现在施肥 150 d；处理 3、

表 2 云南松苗木萌蘖数量动态 Logistics 模型拟合结果
Table 2 Fitting of dynamic logistic model on sprout count of *P. yunnanensis* seedlings

处理 Treatments	k	a	b	速生点 Fast growing point	R^2	F	P
1	7.4812	31.9457	1.1009	29	0.9674	51.0781	0.0001
2	7.8076	12.1406	0.4798	25	0.9785	78.7141	0.0001
3	7.5055	5.7569	0.2226	26	0.9644	46.5785	0.0001
4	7.4650	3.8883	0.1423	27	0.9834	102.8884	0.0001
5	7.1678	6.2320	0.2362	26	0.9750	67.2761	0.0001
6	6.8361	141.6461	4.7373	30	0.9618	43.2031	0.0001
7	7.3449	571.8946	19.0795	30	0.9906	183.9769	0.0001
8	6.1220	64.3657	2.1641	30	0.9883	147.1938	0.0001
9	7.2148	149.5212	4.9989	30	0.9865	127.1308	0.0001

处理 7 的第二个萌蘖高峰出现在施肥 180 d；而处理 1、2、4、5、6 和 8 出现在施肥 150~180 d。综合来看，平茬后云南松苗木第一次萌蘖出生主要集中在 4~5 月，4 月萌蘖出生达到高峰，6 月急剧下降并趋向于 0；7~8 月又出现第二次萌蘖出生，而第二次萌蘖出生高峰因氮、磷用量不同有所差异；9 月之后大部分处理已无新的萌条出生，且后期会出现萌条死亡现象。

2.2 萌蘖数量对氮、磷配施的响应规律

为进一步探讨第一次萌蘖出生阶段 4、5、6 月（施肥 30~90 d）萌蘖数量、第二次萌蘖出生完成后 9 月（施肥 180 d）的萌蘖数量以及截至 12 月（施肥 270 d）最终存活的萌蘖数量与氮、磷肥用量之间的关系，分别以施肥 30、60、90、180 d 和 270 d 的萌蘖数量为因变量进行回归分析，最终各时期的萌蘖数量均获得 17 个二元二次曲面方程。随后根据曲面方程的显著性水平，从中挑选出最优方程，结果见表 3。由表 3 可以看出，不同时期萌蘖数量曲面方

程的显著性水平在 0.005~0.045，说明不同时期的萌蘖与氮、磷肥用量间均显著相关。

在施肥 30 d 后，对云南松苗木进行单因素效应分析，单施氮肥的最优肥料效应方程为 $Y=3.888+9.963N-17.013N^2$ ，即单施氮肥 0.29 g·株⁻¹时，萌蘖数量最大，达 5.3 条；单施磷肥的最优肥料效应方程为 $Y=3.888+0.534P-0.244P^2$ ，即单施磷肥 1.1 g·株⁻¹时，萌蘖数量最大，达 4.2 条；当氮磷配施时，即施氮肥 0.29 g·株⁻¹、磷肥 1.02 g·株⁻¹时，萌蘖数量最大，达 5.6 条，比单施氮肥多 0.3 条，比单施磷肥多 2.4 条。同样在施肥 60、270 d 后，氮磷配施时比单施更利于萌蘖数量的累计。60 d 在施氮肥 0.34 g·株⁻¹、磷肥 1.60 g·株⁻¹时，萌蘖数量最大，达 7.8 条，比单施氮肥多 1.0 条，比单施磷肥多 0.4 条；180 d 在施氮肥 0.45 g·株⁻¹、磷肥 0.26 g·株⁻¹时，萌蘖数量最大，达 6.9 条，比单施氮肥多 0.1 条，比单施磷肥多 0.5 条。

由表 4 可知，施肥 30 d 后云南松苗木萌蘖数量先随氮肥用量的增加而增多，达到最大值以后，其

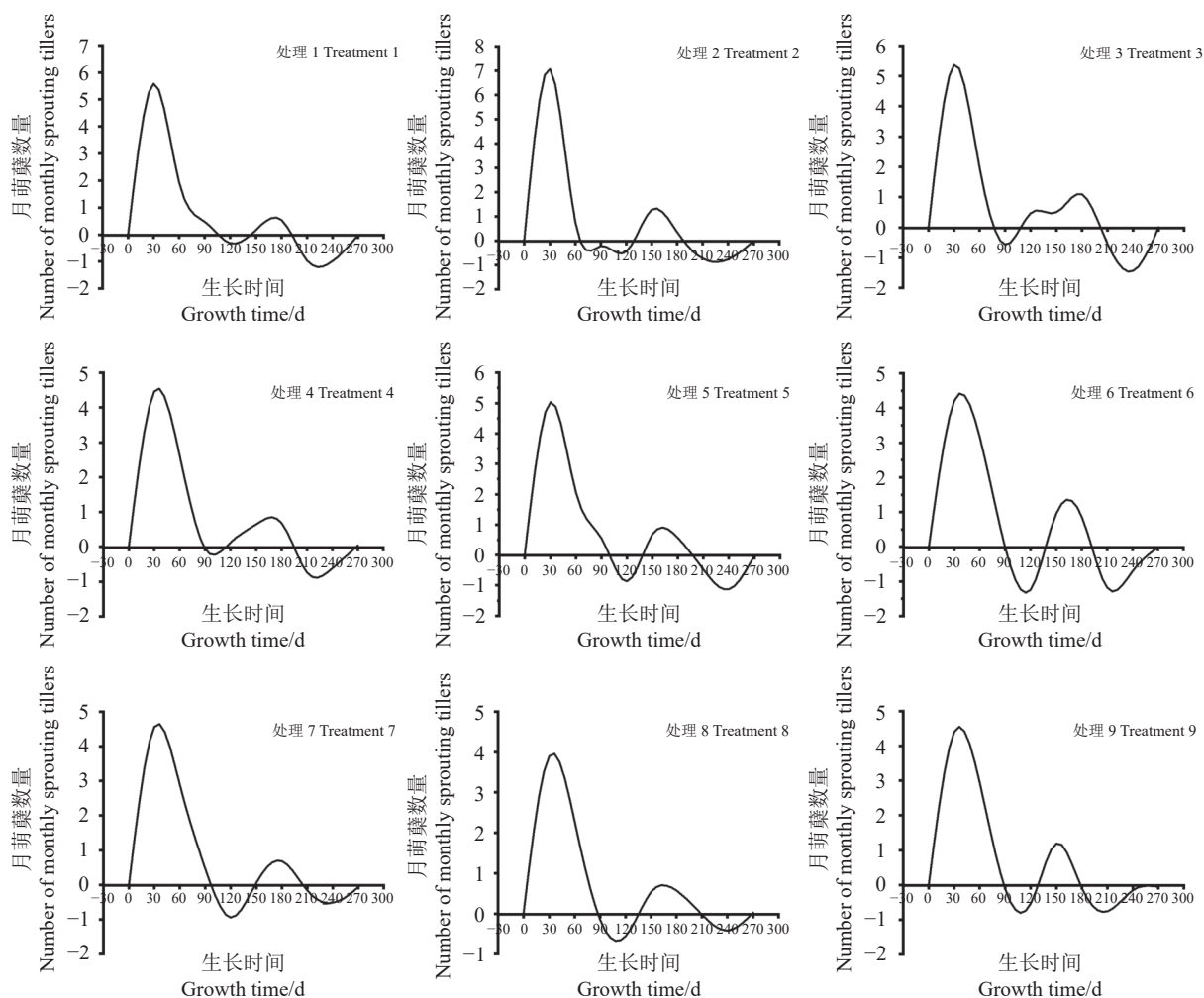


图 2 月萌蘖数量随施肥时间的变化规律

Fig. 2 Changes on monthly sprout count under fertilization

表 3 不同时间的云南松苗木萌蘖数量曲面方程
Table 3 Surface equation on sprout count of *P. yunnanensis* seedlings at different times

施肥时间 Fertilization time/d	曲面方程 Surface equation	R^2	F	P
30	$Y=3.888+9.963N+0.534P-17.013N^2-0.244P^2-0.124NP$	0.173	2.293	0.045
60	$Y=6.321+5.695N+0.299P-10.937N^2+0.240P^2-0.588NP+0.240P^2-0.588NP$	0.136	0.768	0.017
90	$Y=6.598+1.321N+1.648P-0.461N^2-0.321P^2-4.112NP$	0.176	2.293	0.045
180	$Y=7.122+6.172N-0.205P-6.621N^2+1.518P^2-4.510NP$	0.235	3.391	0.005
270	$Y=4.989+7.050N+2.144P-6.210N^2-0.790P^2-4.175NP$	0.217	2.445	0.035

萌蘖数量随氮肥用量的增加而减少；但磷肥用量对该时期的累计萌条数影响不大。同样，施肥 60 d 后的萌蘖数量也先随氮肥用量的增加而增加，达到最大值以后，其萌蘖数量随氮肥用量的增加而减少；不同之处在于，此时磷肥开始对萌蘖数量产生影响，且累计萌条数随磷肥用量的增加不断增加。施肥 90 d 后，累计萌条数随氮、磷用量的不断增大而增加。施肥 180 d 和 270 d 后氮、磷肥同样会对云南松苗木的萌蘖能力产生影响，其萌蘖数量均先随氮肥用量的不断增大而增加，达到最大值之后，其累计萌条数则氮肥用量的增大而减少；而萌蘖数量则随磷肥用量不断增加而增多。

表 4 云南松萌蘖数量在双因素影响下的理论产量
Table 4 Theoretical yield of *P. yunnanensis* sprouts affected by two factors

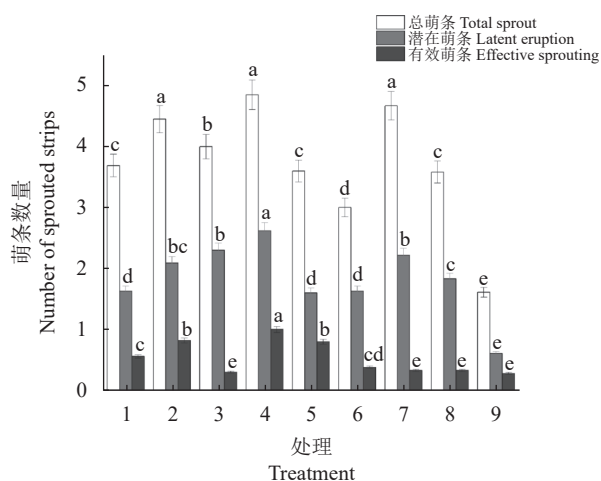
处理 Treatments	氮 Nitrogen/ $(\text{g}\cdot\text{株}^{-1})$	磷 Phosphorus/ $(\text{g}\cdot\text{株}^{-1})$	萌蘖数量 Number of tillers/条				
			30 d	60 d	90 d	180 d	270 d
1	0	0	3.89	6.32	6.60	7.12	4.99
2	0	0.8	4.16	6.71	7.71	7.93	6.20
3	0	1.6	4.12	7.41	8.41	10.68	6.40
4	0.4	0	5.15	6.85	7.05	8.53	6.82
5	0.4	0.8	5.38	7.05	6.85	7.90	6.69
6	0.4	1.6	5.30	7.57	6.24	9.20	5.55
7	0.8	0	0.97	3.88	7.36	7.82	6.65
8	0.8	0.8	1.16	3.89	5.84	5.74	5.19
9	0.8	1.6	1.04	4.22	3.91	5.61	2.72

2.3 不同长度的萌条数对氮、磷配施的响应情况

为进一步探讨氮磷配施对萌蘖生长的影响，以施肥 270 d 后萌蘖的萌条数为研究对象，将所萌蘖的萌条进行等级分类^[15]，其中萌条长度大于 2.5 cm 但小于 5 cm 的萌条称为潜在萌条，而长度大于 5 cm 的称为有效萌条，然后分析氮、磷配施对潜在萌条和有效萌条的影响。从图 3 中可以看出，萌蘖的萌条数量最多的为处理 4、7、2，潜在萌条最多的是处理 4 (2.62 条)，其次较多的是处理 3、7 和 2，分别为 2.30、2.22 和 2.09 条，潜在萌条数量最少的是处理 9，仅为 0.61 条。有效萌条数最多的是处理 4 (1.00 条)，其次较多的是处理 2、5，分别为 0.82、0.80

条，有效萌条数最少的是处理 9，仅为 0.28 条 (图 3)。

由图 4 可知，氮磷配施对不同等级萌条的占比有所影响。处理 3 的潜在萌条所占的比例最高，达 57.50%，其次是处理 6 (54.17%)，潜在萌条所占比例最小的是处理 9，仅为 37.93%。处理 5 有效萌条所占的比例最高，为 22.22%；其次是处理 4 (20.63%)；有效萌条占比最低的是处理 7，仅为 7.14%。综合来看，处理 3 和处理 6 苗木中潜在萌条所占的比例均较高，说明高磷处理有利于潜在萌条的生长，且以单施 1.6 g·株⁻¹ 磷肥更佳。而对有效萌条的生长而言，处理 0.4 g·株⁻¹ 氮肥与 0.8 g·株⁻¹ 磷肥配合施用效果更好，说明中等浓度的氮、磷配施更有利于有效萌条



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$). Same for below.

图 3 氮磷配施对不同长度云南松萌条数量的影响

Fig. 3 Effect of N/P application on number of *P. yunnanensis* sprout strips of varied lengths

的生长。在所有的处理中,潜在萌条占比均比有效萌条大,潜在萌条/有效萌条占比最大的为处理 3 (7.67/1)、处理 7 (6.67/1),萌条长势较弱;潜在萌条/有效萌条占比最小的是处理 5,促萌效果较好,萌条长势相对健壮。

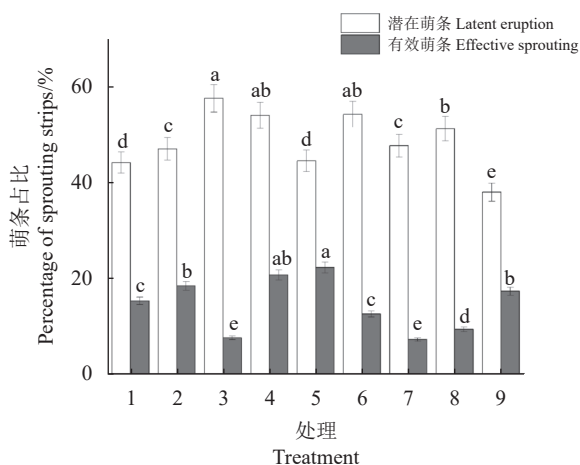


图 4 不同长度云南松苗木萌条数所占比例

Fig. 4 Proportion of *P. yunnanensis* sprouts of varied lengths

3 讨论

平茬后,植物地上生物量大量损失,此时植物可通过萌蘖方式,从干扰破坏中快速恢复^[16]。本研究发现,氮、磷配施后云南松苗木的萌条累计数量均符合 Logistic 增长过程。在沙棘中,平茬后的年内萌蘖出生和萌蘖生长也符合 Logistic 增长过程^[17],这与本研究中观察到的现象一致。不同之处为沙棘平茬后,萌条在初期增长很快,7月中旬达到最大值,

之后缓慢下降,至9月中旬萌条数不再发生变化而达稳定值,其年生长过程是一非对称型的单峰曲线^[18]。而云南松苗木平茬后,月萌条数数量随时间的推移呈双峰曲线,平茬后云南松苗木第一次萌蘖出生主要集中在4~6月,4月萌蘖出生达到高峰,6月急剧下降并趋向于0,8~9月出现第二次萌蘖出生,但第二次萌蘖出生高峰因氮、磷用量不同有所差异。此外,平茬后云南松苗木年生长节律的这种间歇性生长特征,还可能是受到气象因子季节性变化的影响^[15]。因此,平茬后云南松苗木的萌蘖出生和生长主要与植物自身特性有关。

关于木本植物的萌蘖机理,朱万泽等^[19]曾提出了6种假说,即生物地理假说、生境假说、营养假说、干扰假说、资源分配假说和激素调控假说。营养假说中提到:树木萌蘖更新的能力和萌蘖枝的生长与母株根系和周围土壤储存的营养状况相关^[20]。长期以来,施肥被认为是提高土壤营养最直接的措施^[21]。研究发现,平茬后云南松苗木的萌蘖数量受氮、磷肥用量的影响。在第二次萌蘖完成后,平茬后云南松苗木萌蘖数量随着氮肥用量的增加,萌蘖能力增强,这有利于平茬后云南松苗木的迅速恢复,但当氮肥用量超过某一范围时,过量的氮肥就会成为植物生长的限制因子,此后氮肥用量的增加反而抑制平茬后云南松苗木的萌蘖生长,这一研究结果符合 Shelford 耐性定律^[22]。而此时云南松苗木的萌蘖数量随磷肥用量的增加而呈上升趋势,且这一变化规律并不随施肥时间的推移而变化。本研究还发现氮磷配施时比单施更利于萌蘖数量的累计,氮磷配施可促进土壤磷素活化,降低土壤中难溶性磷的比例^[23]。氮磷配施可显著提高作物产量,增加植株对土壤磷的吸收,有效提高磷肥利用率^[24]。

通过不同氮、磷配施处理来看云南松不同萌条长度数量情况,氮、磷配施对云南松苗木萌条的生长起到促进作用,这与谷凌云等^[25]的研究相符。平茬后高氮处理的潜在萌条数量占比较高,说明高磷处理有利于潜在萌条的生长,且以单施 $1.6 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 磷肥更佳。相对单施氮肥而言, $0.4 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 氮肥与 $0.8 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 磷肥配施有效萌条数量占比最高,说明中浓度的氮磷配合施用效果更好。相同磷水平下,适量增施氮肥,可有效提高磷肥利用率,这与施氮促进植株生长以及对磷素的吸收有关^[26]。滇油杉苗木施缓释肥、尿素和磷肥分别为 1.00 、 0.10 和 $0.25 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 配施,可促进苗木生长和生物量积累^[27]。本研究与林国祚^[28]在尾巨桉苗木培育中提出的氮、磷配施有利于苗高和地径生长的研究结果一致。

4 结论

氮、磷配施后云南松苗木的萌条累计数量均符合 Logistic 增长过程。氮、磷后云南松苗木的萌蘖数量随施肥时间的推移呈现“慢-快-慢”的生长趋势，符合“S”形曲线变化。平茬后云南松苗木的萌蘖数量受氮、磷肥用量的影响，在施肥 30 d 后施氮肥 $0.29 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 、磷肥 $1.02 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时，萌蘖数量最大，达 5.6 条，比单施氮肥多 0.3 条，比单施磷肥多 2.4 条。同样在施肥 60、180 d 后，氮磷配施时比单施更利于萌蘖数量的累计。高磷处理有利于云南松苗木潜在萌条的生长，且以单施 $1.6 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 磷肥更佳。中等浓度的氮磷配合施用更有利于有效萌条的生长，即 $0.4 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 氮肥与 $0.8 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 磷肥配施有效萌条数量占比最高。本研究探讨了云南松苗木萌蘖能力对氮磷施肥的响应，明确最佳的氮磷配施用量，为云南松苗木平茬萌蘖的培育奠定实践依据，在实际生产中可根据自身的生产需求进行适量的单施或氮磷配施。

参考文献：

- [1] 郑万均, 傅立国. 中国植物志. 第7卷[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 203-281.
- [2] 吴征镒, 姜彦承, 姜汉桥. 云南植被[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 417-419.
- [3] 金振州, 彭鉴. 云南松[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2004: 154-155.
- [4] 王世端. 平茬—培育优质苗木的重要措施 [J]. 中国花卉盆景, 1990 (11): 11.
WANG S D. Flat stubble-an important measure to cultivate high-quality seedlings [J]. *China Flower & Penjing*, 1990 (11): 11. (in Chinese)
- [5] 鲁如坤. 我国土壤氮、磷、钾的基本状况 [J]. 土壤学报, 1989, 26 (3): 280-286.
LU R K. General status of nutrients (N, P, K) in soils of China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1989, 26 (3): 280-286. (in Chinese)
- [6] 李洪娜, 许海港, 任怡华, 等. 不同施氮水平对矮化富士苹果幼树生长、氮素利用及内源激素含量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (5): 1304-1311.
LI H N, XU H G, REN Y H, et al. Effect of different N application rates on plant growth, ^{15}N -urea utilization and hormone content of dwarf apple trees [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (5): 1304-1311. (in Chinese)
- [7] 李承东. 氮磷钾配比施肥对中国无忧花苗木生长及生理特性的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
LI C D. Effects of combined fertilization of nitrogen, phosphorus and potassium on the growth and physiological characteristics of Chinese worry-free flowers seedlings[D]. Nanning: Guangxi University, 2020. (in Chinese)
- [8] 左永忠, 任宏忠, 刘滨, 等. 苗木施肥生理基础及优化施肥的研究 [J]. 河北林果研究, 1994, 9 (S1): 97-103.
ZUO Y Z, REN H Z, LIU B, et al. Studies on rational fertilization of seedling and its physiological aspects [J]. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 1994, 9 (S1): 97-103. (in Chinese)
- [9] 张跃敏, 李根前, 李莲芳, 等. 氮磷配施对云南松实生苗生长的效应 [J]. 西南林学院学报, 2009 (3): 5-10.
ZHANG Y M, LI G Q, LI L F, et al. Fertilization effect of nitrogen combination with phosphorus on seedling growth of *Pinus yunnanensis* [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2009 (3): 5-10. (in Chinese)
- [10] 王瑜, 车凤仙, 方芳, 等. 氮、磷叶面施肥对云南松苗木萌蘖的影响 [J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2021, 41 (6): 41-48.
WANG Y, CHE F X, FANG F, et al. Response of sprouting ability of *Pinus yunnanensis* seedlings to different rates of nitrogen and phosphorus foliar fertilizer [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2021, 41 (6): 41-48. (in Chinese)
- [11] 李亚麒, 聂恺宏, 王军民, 等. 云南松苗木分化对生物量分配的影响 [J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2019, 39 (5): 41-45.
LI Y Q, NIE K H, WANG J M, et al. Effect of seedling differentiation of *Pinus yunnanensis* on biomass allocation [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2019, 39 (5): 41-45. (in Chinese)
- [12] 张跃敏, 李根前, 李莲芳, 等. 氮磷配施对云南松实生苗生长的影响 [J]. 林业调查规划, 2009, 34 (3): 27-32.
ZHANG Y M, LI G Q, LI L F, et al. Effect of combined application of nitrogen and phosphorus on the growth of *Pinus yunnanensis* seedlings [J]. *Forest Inventory and Planning*, 2009, 34 (3): 27-32. (in Chinese)
- [13] 刘君, 朱良其, 黑银秀, 等. 西兰花苗期生长模型的拟合和分析 [J]. 浙江农业学报, 2016, 28 (12): 2040-2046.
LIU J, ZHU L Q, HEI Y X, et al. Growth model fitting and analysis of broccoli seedlings [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2016, 28 (12): 2040-2046. (in Chinese)
- [14] 马鄂超, 何江勇, 杨国江. 第四讲肥料效应田间试验设计 [J]. 新疆农垦科技, 2006, 29 (2): 58-60.
MA E C, HE J Y, YANG G J. The fourth lecture is the field experiment design of fertilizer effect [J]. *Xinjiang Farmland Reclamation Science & Technology*, 2006, 29 (2): 58-60. (in Chinese)
- [15] 陈素传, 肖正东, 江朝宝, 等. 欧洲榛子平茬促萌试验 [J]. 安徽农业科学, 2000, 28 (5): 661.
CHEN S C, XIAO Z D, JIANG C B, et al. The experiment in filbert germination [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2000, 28 (5): 661. (in Chinese)
- [16] 陈沐, 曹敏, 林露湘. 木本植物萌生更新研究进展 [J]. 生态杂志, 2007, 26 (7): 1114-1118.
CHEN M, CAO M, LIN L X. Research advances in regeneration of woody plants by sprouting [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26 (7): 1114-1118. (in Chinese)
- [17] 聂恺宏, 吉生丽, 邹旭, 等. 中国沙棘平茬萌蘖动态及其对种群结构的影响 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 2018, 40 (4): 804-813.
NIE K H, JI S L, ZOU X, et al. Stump sprouting dynamics of *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis* and its effects on population structure [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2018, 40 (4): 804-813. (in Chinese)

- [18] 胡建忠. 沙棘平茬后年生长节律及再生能力的研究 [J]. 沙棘, 1991 (4): 25-32.
- HU J Z. Study on the Growth Rhythm and regenerative ability of Hippophae rhamnoides stumping in Later Years [J]. *Seabuckthorn Hippophae*, 1991 (4): 25-32. (in Chinese)
- [19] 朱万泽, 王金锡, 罗成荣, 等. 森林萌生更新研究进展 [J]. 林业科学, 2007, 43 (9): 74-82.
- ZHU W Z, WANG J X, LUO C R, et al. Progresses of studies on forest sprout regeneration [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43 (9): 74-82. (in Chinese)
- [20] 冯辉, 王海洋, 张楠, 等. 森林木本植物萌蘖更新的研究进展 [J]. 贵州农业科学, 2011, 39 (9): 177-180, 184.
- FENG H, WANG H Y, ZHANG N, et al. Research progress of sprout tiller regeneration of forest woody plants [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2011, 39 (9): 177-180, 184. (in Chinese)
- [21] 杨珍平, 郝教敏, 苗果园. 黄土母质生土当年施肥对混作根际土壤生物活性及土壤营养的影响 [J]. 水土保持学报, 2010, 24 (5): 223-227, 257.
- YANG Z P, HAO J M, MIAO G Y. Effect of immature loess subsoil fertilization in current year on rhizospheric soil biological activity and nutrient of mixture cropping [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24 (5): 223-227, 257. (in Chinese)
- [22] 李博. 生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [23] 焦亚鹏, 齐鹏, 王晓娇, 等. 氮磷配施对黄土高原旱作农业区典型农田土壤无机磷形态的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (8): 1459-1472.
- JIAO Y P, QI P, WANG X J, et al. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on inorganic phosphorus forms of typical farmland soil in the dry farming area of the Loess Plateau [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2020, 26 (8): 1459-1472. (in Chinese)
- [24] 陈磊, 郝明德, 张少民. 黄土高原长期施肥对小麦产量及肥料利用率的影响 [J]. 麦类作物学报, 2006, 26 (5): 101-105.
- CHEN L, HAO M D, ZHANG S M. Effect of long-term application of fertilizer on wheat yield and fertilizer use efficiency in loess plateau [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26 (5): 101-105. (in Chinese)
- [25] 谷凌云, 和亚君, 李福秀. 不同水肥管理对川滇桉木萌条生长及热值的影响 [J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2011, 26 (5): 683-688.
- GU L Y, HE Y J, LI F X. Effects on Growth and Heat Value of *Alnus ferdinandii-coburgii* Different Water and Fertilizer Managements [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2011, 26 (5): 683-688. (in Chinese)
- [26] 王晓丽, 杨杰, 吴波, 等. 氮、磷配施对直干桉苗木生长和养分含量的影响 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 2022, 44 (1): 171-178.
- WANG X L, YANG J, WU B, et al. Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on the growth and nutrient content of *Eucalyptus maidenii* seedlings [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2022, 44 (1): 171-178. (in Chinese)
- [27] 付志高, 李莲芳, 王凯, 等. 缓释肥及氮和磷肥配施对滇油杉野生移栽苗木生长和生物量的影响 [J]. 四川农业大学学报, 2021, 39 (2): 212-219.
- FU Z G, LI L F, WANG K, et al. Effects of slow-release fertilizer matching N and P fertilizer on growth and biomass for wild transplanted seedlings of *Keteleeria evelyniana* [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2021, 39 (2): 212-219. (in Chinese)
- [28] 林国祚, 彭彦, 谢耀坚. 不同营养液下尾巨桉幼苗生长及生理特性的变化 [J]. 热带作物学报, 2012, 33 (3): 499-504.
- LIN G Z, PENG Y, XIE Y J. Growth and physiological characteristics changes of *Eucalyptus urophylla* × *e. grandis* seedlings in different nutrient solutions [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2012, 33 (3): 499-504. (in Chinese)

(责任编辑: 林海清)