

和滢埕,唐军荣,李亚麒,等. 外源氮磷添加对云南松苗木生长及根系形态的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(19):116-124.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.19.018

# 外源氮磷添加对云南松苗木生长及根系形态的影响

和滢埕<sup>1,2</sup>, 唐军荣<sup>1,2</sup>, 李亚麒<sup>3</sup>, 母德锦<sup>1</sup>, 陈诗<sup>1,2</sup>, 蔡年辉<sup>1,2</sup>, 许玉兰<sup>1,2</sup>, 陈林<sup>1,2</sup>

(1. 西南林业大学西南地区生物多样性保育国家林业和草原局重点实验室, 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. 云南省农业科学院热带亚热带经济作物研究所, 云南保山 678000)

**摘要:**为探究不同氮磷配施对云南松苗木生长的影响,从苗木生长量、根系形态、叶绿素含量、生物量以及异速生长分析和相关性分析等方面探究外源氮磷添加对云南松苗木生长的影响,从而找到最适合云南松苗木生长的氮磷配比。以2年生云南松苗木为研究材料,通过氮磷配施,定期测定云南松苗木的生长量、叶绿素含量、根系形态以及生物量,并分析这些指标对氮磷配施的响应规律。结果表明,氮磷肥可以有效促进云南松苗木生长,改变云南松苗木生长轨迹,且相关性分析结果表现为两两指标间均为正相关关系。氮磷配施的效果明显优于单施氮肥或单施磷肥,单施氮肥或磷肥效果不佳,但氮磷配比含量过高会抑制云南松生长。施肥可以显著促进云南松苗木生长,整体而言,氮0.4 g/株、磷0.8 g/株的氮磷配比为云南松苗木生长最佳施肥量,对云南松苗木生长具有明显的促进作用,进而为培育优质云南松实生苗提供理论参考依据。

**关键词:**云南松;最佳施肥量;苗木生长;根系形态;氮磷配施;异速生长

**中图分类号:**S791.257 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)19-0116-09

云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch.) 是松科

(Pinaceae) 松属 (*Pinus*) 常绿针叶乔木,主要运用于木材和木纤维工业原料制造等,是我国西南地区重要的乡土树种<sup>[1]</sup>。在园林绿化、水土保持、涵养水源等方面起到重要作用,同时对分布区的社会、经济和生态可持续方面具有重要意义<sup>[2-5]</sup>。近年来,云南松林分开始表现出衰退的现象,一些优良种质资源逐渐减少<sup>[6]</sup>。因此,云南松遗传改良极为重要,其中良种壮苗是关键。施肥可以促进云南松实生苗树干和根系生长,为提高造林成活率奠定基础,同时还能促进苗期生长<sup>[7]</sup>。因此,对云南松苗

收稿日期:2023-02-01

基金项目:云南省万人计划青年拔尖人才项目(编号:YNWR-QNBJ-2019-075);国家自然科学基金(编号:31860203);云南省研究生导师团队建设项目(编号:2022-97);西南林业大学校科研基金项目(编号:01108-18200133);云南省“兴滇英才支持计划”青年人才专项(编号:XDYC-QNRC-2022-0250)。

作者简介:和滢埕(1997—),女,云南丽江人,硕士研究生,主要从事林木遗传育种研究。E-mail:2476747423@qq.com。

通信作者:陈林,博士,副研究员,主要从事微生物生态与森林培育研究。E-mail:linchen@sfnu.edu.cn。

[31] Kinkema M, Fan W, Dong X. Nuclear localization of NPR1 is required for activation of *PR* gene expression[J]. *The Plant Cell*, 2000,12(12):2339-2350.

[32] Reymond P, Farmer E E. Jasmonate and salicylate as global signals for defense gene expression[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 1998,1(5):404-411.

[33] 徐曼宇. 小麦韧皮部抗蚜防卫反应与乙烯信号的调控作用[D]. 南京:南京农业大学,2015:7-8.

[34] Lv H F, Cao H S, Nawaz M A, et al. Wheat intercropping enhances the resistance of watermelon to *Fusarium* wilt[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018,9:696.

[35] 杨帆. 伴生植物根系分泌物对根结线虫及番茄抗性的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2020.

[36] 石延霞,张晓慧,谢学文,等. 新化合物吡唑并嘧啶衍生物(BDO-

1)和哒嗪酮衍生物(PDZ-1)的诱导抗病性研究[J]. *农药学报*, 2018,20(6):721-728.

[37] 吕慧芳. 小麦||西瓜间作体系中根系分泌物的变化及其对西瓜枯萎病抗性的影响机制[D]. 武汉:华中农业大学,2019:26-27.

[38] 蔡莹,于晓菲. 植物根系分泌物的生态效应研究[J]. *环境生态学*, 2022,4(9):9-16.

[39] 李春霞. 伴生小麦对西瓜枯萎病抗性调控的机理研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2019:45-46.

[40] 刘一鸣,杨智仙,董艳. 对羟基苯甲酸胁迫下间作对蚕豆枯萎病发生和根系抗氧化酶活性的影响[J]. *核农学报*, 2017,31(5):987-995.

[41] Gao X, Wu M, Xu R N, et al. Root interactions in a maize/soybean intercropping system control soybean soil-borne disease, red crown rot[J]. *PLoS One*, 2014,9(5):e95031.

木生长的施肥研究就显得尤为重要。氮、磷是植物生长所必需的 2 种物质,在植物生长发育过程中,能够促进植物根系粗生长以及树干高生长,且云南松苗木生长初期的生长状态会直接决定其未来生长趋势。因此,确定适宜的施肥量和肥料配比,提高云南松苗期生物量,是云南松施肥研究的关键问题之一<sup>[7-8]</sup>。氮磷配施研究主要集中在苗木生长量和生物量与氮、磷用量之间的关系,植物体不同生长指标对氮磷用量和配比的响应规律研究 2 个方面<sup>[9]</sup>。佟志龙等认为,人工林乔木层由于其生物量占比较大,植株的氮磷含量较高,在人工林中的云南松同样具有较强的氮吸收能力,其余累积量较多的营养元素分别为钙、钾、镁和磷<sup>[10-11]</sup>。汪梦婷等认为,2 年生云南松苗木分配给叶的生物量较多,而分配给根的较少,说明苗龄对云南松各器官营养元素分配产生很大的影响<sup>[12]</sup>。在施肥条件下,缺少氮、磷元素都会对云南松苗木生长产生显著影响,任一元素含量过高或过低均不利于树体对氮、磷、钾元素的吸收和积累<sup>[13]</sup>。如在低磷胁迫下,云南松幼苗以降低茎叶生物量为代价来提高根冠比,并保持根系生物量在较高的水平维持整个生命<sup>[14]</sup>。同时施肥可以提高植物叶片的净光合速率,显著改善植物的光合能力,施肥不足或过量会导致植物叶绿素含量下降,影响植物生长发育<sup>[15-16]</sup>。张跃敏等认为,云南松幼苗氮磷配施的效果显著优于施用单种肥料,其更侧重于苗木地上部分的研究<sup>[7]</sup>。生长指标间的异速生长轨迹是否发生改变可以作为判断苗木生长的重要依据<sup>[17]</sup>。蔡年辉等认为,植物各指标间是相互关联相互影响的,但没有阐述施肥对苗木生长表现的异速生长及相关性<sup>[18]</sup>。因此,本研究以云南松实生苗为研究对象,揭示不同含量配比的氮、磷添加对云南松苗木地上和地下部分生长的综合影响,进而筛选出最适合云南松苗木生长的施肥配方,以期为培育优质云南松实生苗提供理论参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究地概况

试验地点设置在西南林业大学温室大棚内,该地属于北亚热带半湿润高原季风气候,干湿季分明,海拔为 1 945 m,地处 25°04'00"N、102°45'41"E。该试验地平均气温为 14.5 ℃,降水集中在 5—9 月,年降水量为 1 000.5 mm,相对湿度 76%,光照充足、全年温差小、霜期短。

### 1.2 试验材料

种子采集于云南省弥渡云南松无性系种子园,试验所施肥料为氮肥(脲素)、磷肥(过磷酸钙)。供试苗木为 2 年生云南松实生播种苗,共 9 个小区,每个小区 40 盆,重复 3 次。

### 1.3 试验设计

本试验采用氮、磷施用量的 2 因素 3 水平设计,共 9 个处理。氮、磷用量参照王瑜等的研究方法,选取高、中、对照 3 个梯度<sup>[19]</sup>,其中氮肥的高水平为 0.8 g/株,磷肥的高水平为 1.6 g/株。2020 年 7 月 1 日第 1 次对云南松苗木施肥,之后每隔 15 d 施肥 1 次,共施 4 次,之后定期浇水、松土除草(表 1)。

表 1 氮磷添加施肥处理组合

处理	试验组合	
	氮用量(g/株)	磷用量(g/株)
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

1.4.1 生长量测定 施肥结束后,2020 年 12 月测量云南松苗木生长量指标,采用精度为 0.01 mm 的游标卡尺测量地径,用精度 0.1 cm 的直尺测量云南松苗高和针叶长,共测量 1 080 株云南松苗木生长量指标。

1.4.2 根系指标测定 采用全挖法对云南松苗木根系进行挖取,挖取时尽量保持样品的完整性。在各小区内随机选取 2 株长势相同的云南松幼苗(共 54 株)。用去离子水清洗云南松幼苗,在根茎处取地下部分。采用 Epson 根系扫描仪进行根系扫描,扫描后用 WinRHIZO 分析软件进行总根长(cm)、根系表面积(cm<sup>2</sup>)、根系平均直径(mm)、根系总体积(cm<sup>3</sup>)等数据获取,结果保留 2 位小数。

1.4.3 叶绿素含量测定 根据试验设置,各处理随机选取 8 株长势一样的苗木,用混合采样法摘取各植株上当年生成成熟的功能叶,用丙酮提取法测定。用 722 型可见光分光光度计进行比色,测定 663、645、470 nm 波长处的吸光度,重复 3 次,记录叶绿

素吸光度指标。通过吸光度计算叶绿素的浓度,再由浓度计算叶绿素的含量值。叶绿素含量 = (浓度 × 体积) / (质量 × 1 000), 其中总体积为 25 mL, 样品鲜质量为 0.50 g。

1.4.4 生物量测定 用整株收获法进行苗木挖取, 每个处理随机选取 2 株长势一致的云南松苗木用于生物量测定, 重复 3 次。将每株苗木分为根、茎和叶, 在 105 ℃ 的烘箱中杀青 30 min 后, 调至 80 ℃ 进行烘干处理至质量恒定, 测量生物量, 精确至 0.001 g。

### 1.5 数据处理

年底处于生长季的过渡阶段, 统计施肥后云南松幼苗 12 月的数据, 并对整个生长季的数据进行总结分析。数据采用 SPSS 分析软件进行均值比较和显著性检验 (Duncan's 法) 以及相关性分析。使用 GraphPad Prism 7 软件进行绘图。计算各处理云南松生长指标的变异系数 = 标准差 / 平均值 × 100%。用标准化主轴估计法 (SMA) 获得异速生长方程的

参数估计, 软件 SMATR Version 2.0 计算完成, 建立各个生长量之间以及各个根系生长指标之间的异速生长方程。常用公式为  $y = ax^{b[20-21]}$ 。对数形式表示为  $\lg y = b \lg x + \lg a$ 。其中:  $b$  表示该直线的斜率, 即异速生长指数<sup>[22]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 云南松苗木生长量对氮磷配施的响应

由表 2 可知, 对云南松幼苗根系施肥可以显著促进云南松苗木生长, 氮 0.4 g/株和磷 0.8 g/株配施下云南松苗木最高, 其变异系数范围为 3.06% ~ 16.29%; 针叶长在 20.38 ~ 25.20 cm 之间, 施肥量为氮 0.8 g/株、磷 0.8 g/株时, 其针叶最长, 针叶长的变异系数最小值为 1.64%; 处理 5 的地径最大, 为 17.80 mm, 各处理地径变异系数范围为 2.52% ~ 15.57%; 高径比的范围为 9 ~ 11。

表 2 氮磷添加施肥对云南松生长量分析

处理	苗高		针叶长		地径		高径比	
	数值 (cm)	变异系数 (%)	数值 (cm)	变异系数 (%)	数值 (mm)	变异系数 (%)	数值	变异系数 (%)
1	12.52 ± 0.16d	3.06	20.38 ± 0.42c	5.10	12.86 ± 0.73d	13.92	9.89 ± 0.51ab	12.68
2	13.67 ± 0.64cd	11.50	21.39 ± 0.98bc	11.27	14.66 ± 0.15cd	2.52	9.32 ± 0.43b	11.18
3	14.59 ± 0.25c	4.21	20.70 ± 0.41c	4.90	14.03 ± 0.42cd	7.40	10.43 ± 0.28a	6.63
4	14.12 ± 0.41cd	7.11	21.64 ± 0.72bc	8.20	14.62 ± 0.41cd	6.81	9.65 ± 0.01ab	0.34
5	17.34 ± 0.59a	8.33	23.03 ± 0.51b	5.45	17.80 ± 0.59a	8.09	9.74 ± 0.01ab	0.28
6	14.80 ± 0.98c	16.29	21.76 ± 0.65bc	7.30	15.65 ± 0.65bc	10.16	9.45 ± 0.39ab	10.21
7	15.15 ± 0.64bc	10.41	21.74 ± 0.15bc	1.64	15.56 ± 0.99bc	15.57	9.81 ± 0.40ab	9.96
8	16.81 ± 0.51ab	7.49	25.20 ± 0.59a	5.71	17.16 ± 0.52ab	7.40	9.80 ± 0.01ab	0.20
9	13.72 ± 0.69cd	12.35	20.84 ± 0.69c	8.09	13.82 ± 0.69cd	12.22	9.93 ± 0.01ab	0.20

注: 数据为平均值 ± 标准误。同列数据后不同小写字母表示差异显著。下同。

### 2.2 云南松苗木根系形态对氮磷配施的响应

由表 3 可知, 氮 0.4 g/株、磷 0.8 g/株的混合肥料能对促进云南松苗木的根系生长最有效, 其苗木根系 4 个指标 (总根长最大值 2 440.89 cm、根系表面积最大值 491.66 cm<sup>2</sup>、根系平均直径最大值 2.70 mm、根系总体积最大值 8.37 cm<sup>3</sup>) 均有所体现。未施肥的处理 1 与施肥过量的处理组根系长势均较差。氮 0.4 g/株、磷 0.8 g/株时, 其总根长的变异系数为 24.06%, 根系表面积 22.93%, 根系平均直径 6.19%, 根系总体积 20.60%。

### 2.3 云南松苗木叶绿素对氮磷配施的响应

云南松苗木叶绿素含量分析见图 1, 处理 5 云

南松苗木的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、叶绿素总含量均最大, 分别为 0.76、0.23、0.12、0.99 mg/g, 且与其余处理差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 2.4 云南松苗木生物量对氮磷配施的响应

云南松苗木各器官生物量在不同处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ , 图 2)。根、茎、叶、地上和单株中处理 5 的生物量均表现为最大。未施肥的处理 1、施肥过量的处理 9 以及单施磷肥的处理 2 和处理 3 生物量相对较少, 不同施肥处理云南松苗木生物量表现为叶 > 茎 > 根, 较多的生物量投资到叶和茎上, 而投资给根的生物量相对较少。

表 3 氮磷添加施肥对云南松根系形态分析

处理	总根长		根系表面积		根系平均直径		根系总体积	
	数值 (cm)	变异系数 (%)	数值 (cm <sup>2</sup> )	变异系数 (%)	数值 (mm)	变异系数 (%)	数值 (cm <sup>3</sup> )	变异系数 (%)
1	954.72 ± 126.56c	32.47	236.93 ± 31.30c	32.36	1.94 ± 0.04c	4.71	4.39 ± 0.28d	15.77
2	980.83 ± 172.85c	43.17	249.49 ± 20.19bc	19.82	2.05 ± 0.09c	10.73	5.24 ± 0.40cd	18.48
3	1 331.74 ± 88.43bc	16.26	279.40 ± 38.51bc	33.76	2.20 ± 0.20bc	22.08	5.53 ± 0.67bcd	29.51
4	1 111.13 ± 141.59c	31.21	324.74 ± 25.95bc	19.57	2.61 ± 0.17ab	16.37	5.86 ± 0.52bcd	21.55
5	2 440.89 ± 239.71a	24.06	491.66 ± 46.03a	22.93	2.70 ± 0.07a	6.19	8.37 ± 0.70a	20.60
6	1 500.75 ± 202.05bc	32.98	333.59 ± 47.68bc	35.01	2.59 ± 0.21ab	20.06	6.47 ± 0.61bc	22.98
7	1 479.76 ± 272.33bc	45.08	307.60 ± 23.38bc	18.62	2.45 ± 0.13ab	13.24	6.16 ± 0.37bc	14.89
8	1 717.27 ± 154.31b	22.01	354.91 ± 31.69b	21.87	2.69 ± 0.07a	6.21	7.09 ± 0.60ab	20.55
9	1 061.50 ± 218.99c	50.53	284.68 ± 37.92bc	32.62	2.01 ± 0.09c	11.39	5.71 ± 0.52bcd	22.35

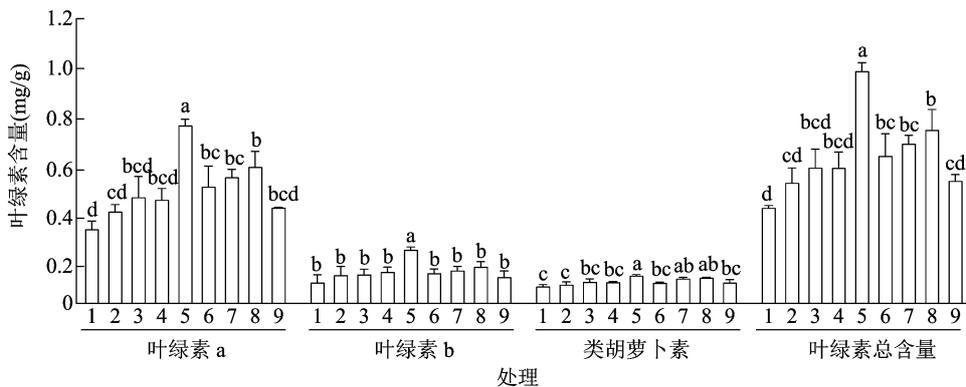


图1 氮磷添加施肥对云南松叶绿素分析

2.5 氮磷配施下云南松苗木生长间的异速生长关系

由于云南松苗木生长中生长量和根系形态最能代表苗木的生长状况,云南松苗木各生长指标的异速生长轨迹可能由于肥料的施用发生显著变化。因此,本研究对云南松生长量和根系生长指标在不同肥料施用下的异速生长状况进行分析。

云南松苗木各生长量之间均存在显著或极显著差异的异速生长关系或等速生长关系(表4),苗高-针叶长、地径-苗高、针叶长-地径各处理之间无共同的 SMA 斜率,有显著差异( $P < 0.05$ ),表示不同氮磷施用处理下云南松幼苗各生长量之间的异速生长轨迹发生了显著变化。在苗高-针叶长 9 个处理中,处理 7 和处理 9 表现为异速生长关系( $P_{-1.0} < 0.05$ ),其余 7 个处理表现为等速生长关系( $P_{-1.0} > 0.05$ );从异速生长处理的斜率( $b$ )来看,2 个处理苗高的生长均明显快于针叶长的生长( $b > 1$ ),处理 7 的斜率最大,与其余 8 个处理间有显著差异。在地径-苗高 9 个处理中,处理 1、处理 2 和处

理 5 表现为异速生长关系( $P_{-1.0} < 0.05$ ),其余处理均表现为等速生长关系( $P_{-1.0} > 0.05$ );从异速生长处理的斜率( $b$ )来看,处理 1 的地径生长快于苗高( $b > 1$ ),而处理 2 和处理 5 的地径生长慢于苗高( $b < 1$ );处理 1 的斜率最大,且与其他处理有显著差异。在针叶长-地径 9 个处理中,处理 2、处理 6、处理 7 和处理 9 表现为异速生长关系( $P_{-1.0} < 0.05$ ),其余表现为等速生长关系( $P_{-1.0} > 0.05$ );从异速生长处理的斜率( $b$ )来看,处理 2 针叶长生长明显快于地径的生长( $b > 1$ ),处理 6、处理 7 和处理 9 均为地径生长快于针叶长生长( $b < 1$ );处理 2 的斜率最大,与其余 8 个处理的斜率之间均有显著差异。

云南松苗木各根系生长指标均存在显著或极显著的异速生长关系或等速生长关系(表5)。根系总体积-总根长之间无共同的 SMA 斜率,说明总体上看处理间有显著差异( $P < 0.05$ )。在根系总体积-总根长 9 个处理中,处理 9 为异速生长关系( $P_{-1.0} < 0.05$ ),其余 8 个处理均为等速生长关系

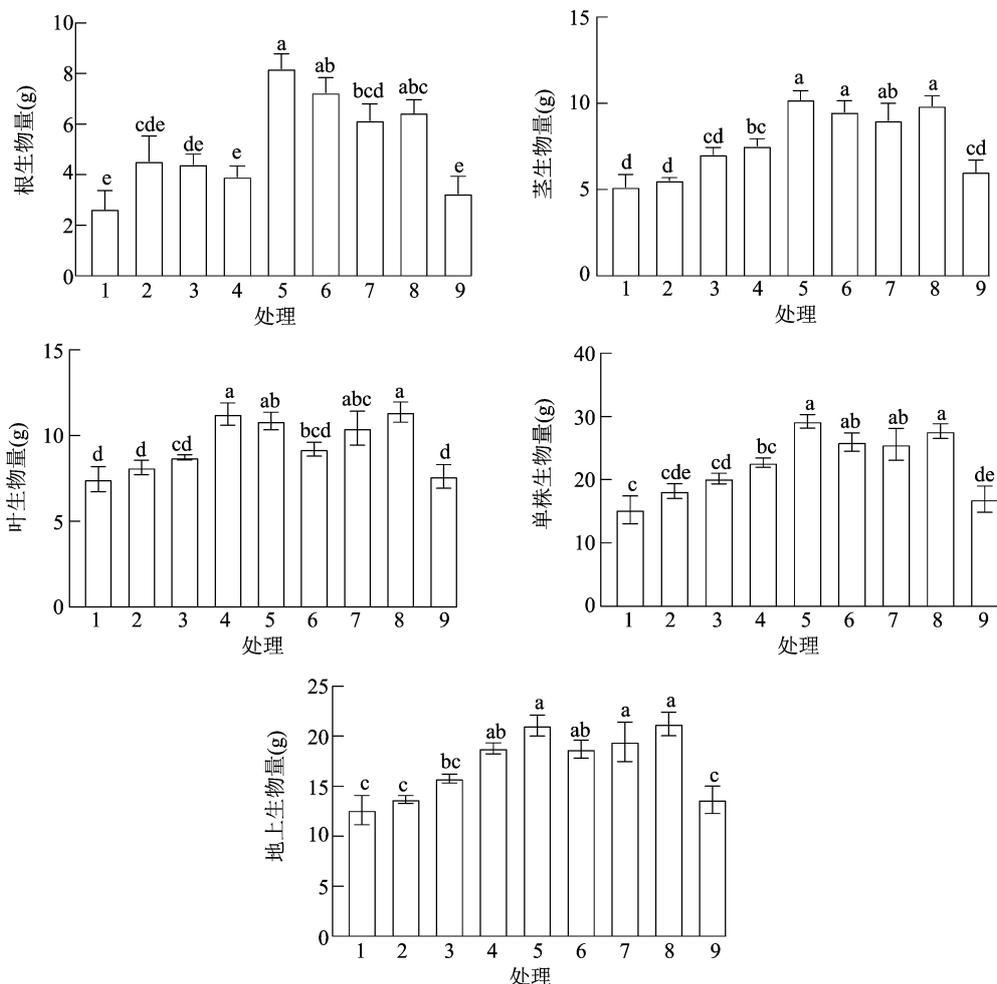


图2 氮磷添加施肥对云南松生物量分析

( $P_{-1.0} > 0.05$ )。从异速生长处理的斜率( $b$ )来看,处理9的根系总体积的生长慢于总根长的生长( $b < 1$ )。

根系表面积-根系平均直径、根系平均直径-根系总体积之间有共同的 SMA 斜率,说明处理之间差异不显著( $P > 0.05$ )。在根系表面积-根系平均直径9个处理中,处理1、处理3、处理5、处理8和处理9表现为异速生长关系( $P_{-1.0} < 0.05$ ),其余均为等速生长关系。从异速生长处理的斜率( $b$ )来看,处理3为根系平均直径生长长势比根系表面积差( $b > 1$ ),其余为根系平均直径生长长势比根系表面积好( $b < 1$ )。在根系平均直径-根系总体积的9个处理中,处理1、处理5和处理8表现为异速生长关系( $P_{-1.0} < 0.05$ ),其余均为等速生长关系,从异速生长处理的斜率( $b$ )来看,3个处理均表现为根系平均直径的生长慢于根系总体积的生长( $b < 1$ )。

## 2.6 氮磷配施下云南松苗木各指标间的相关性

施用不同配比的氮磷混合肥料后,云南松苗木

各指标间相关性分析结果表明,两两指标间均表现为正相关关系(表6)。其中,茎、叶、地上三者生物量与根系表面积之间、根系总体积与根系平均直径之间、叶生物量与总根长之间均呈现显著相关性( $P < 0.05$ )。根系表面积与针叶长、根系平均直径与总根长之间相关性不显著( $P > 0.05$ ),其余指标间均呈现极显著正相关( $P < 0.01$ )。

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

植物的生长主要由养分的吸收与利用决定,植物的生长发育直接受氮和磷的吸收、同化和转运的影响<sup>[23]</sup>,本研究发现未施肥的处理长势均比施肥处理的长势差,同时氮磷配施处理的长势比单施处理好,这与韦娜的研究结果相似,即适宜的施肥浓度是培育优质健壮苗木的主要因素<sup>[24]</sup>。过多的养分会导致参与碳同化的关键酶活性降低,从而减弱光合作用,还会使幼苗的呼吸作用增强,导致苗木生

表4 氮磷添加施肥对云南松生长量的异速生长分析

参数	处理	相关生长指数(斜率)				等速生长检验(指数)	
		$r^2$	$P$	95%置信区间	斜率( $b$ )	$F$	$P_{-1.0}$
苗高-针叶长	1	0.207	0.364	[-1.672, -0.209]	-0.592c	1.521	0.285
	2	0.461	0.138	[0.433, 2.594]	1.060bc	0.025	0.882
	3	0.129	0.484	[-2.602, -0.303]	-0.888c	0.066	0.810
	4	0.027	0.755	[-2.579, 0.275]	-0.842c	0.124	0.743
	5	0.046	0.683	[-4.569, -0.494]	-1.503c	0.734	0.440
	6	0.559	0.088	[0.897, 4.670]	2.046b	5.499	0.079
	7	0.603	0.069	[2.965, 14.385]	6.531a	102.531	0.001
	8	0.059	0.642	[-4.009, -0.439]	-1.326c	0.347	0.587
	9	0.999	0.000	[1.457, 1.558]	1.506bc	1220.878	0.000
	无共同斜率	$t = 15.447$	$P = 0.049$				
地径-苗高	1	0.041	0.700	[1.452, 13.477]	4.423a	18.370	0.013
	2	0.047	0.678	[0.073, 0.673]	0.221c	19.365	0.012
	3	0.304	0.256	[0.669, 4.833]	1.798ab	2.217	0.211
	4	0.999	0.000	[0.913, 1.011]	0.961b	4.711	0.096
	5	1.000	0.000	[0.946, 0.996]	0.971b	10.013	0.034
	6	0.545	0.094	[0.298, 1.583]	0.686bc	1.307	0.317
	7	0.542	0.095	[0.589, 3.148]	1.362ab	0.862	0.406
	8	0.999	0.000	[0.958, 1.024]	0.991b	0.634	0.471
	9	1.000	0.000	[0.972, 1.009]	0.990b	1.998	0.230
	无共同斜率	$t = 19.099$	$P = 0.014$				
针叶长-地径	1	0.177	0.406	[0.133, 1.096]	0.382cd	6.072	0.069
	2	0.572	0.082	[1.886, 9.626]	4.261a	37.872	0.004
	3	0.020	0.787	[-1.926, -0.204]	-0.627d	0.959	0.383
	4	0.022	0.781	[-3.798, -0.403]	-1.237d	0.187	0.688
	5	0.045	0.686	[-2.085, -0.225]	-0.686d	0.626	0.473
	6	0.999	0.000	[0.690, 0.735]	0.712b	936.009	0.000
	7	0.547	0.093	[0.049, 0.259]	0.112d	170.337	0.000
	8	0.051	0.667	[-2.311, -0.251]	-0.761d	0.321	0.601
	9	1.000	0.000	[0.657, 0.684]	0.670c	3406.662	0.000
	无共同斜率	$t = 31.236$	$P = 0.001$				

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著; $P$ 表示方程拟合的显著性; $P_{-1.0}$ 表示斜率与理论值1.0的差异显著性。表5同。

长量减少<sup>[25]</sup>。因此,苗木地下部分生长不良,吸收水肥能力弱,也将影响到地上部分枝叶的生长<sup>[26]</sup>。

植物在生长发育过程中地上、地下部分的养分需求相互依赖、相互制约,但因为生理功能和生长环境不同,所以对环境因子的反应存在很大差异<sup>[27]</sup>。此外,苗木对营养元素具有一定的忍耐度,氮磷用量在忍耐度以内会促进苗木生长,超过忍耐度则会抑制苗木生长<sup>[28]</sup>。本研究对生长量、根系生长、光合色素、生物量等进行分析,发现中氮中磷能更好地促进云南松苗木生长。一般而言,氮添加在一定程度上能促进植物生长,但长期过量施用氮会抑制植物的生长速率<sup>[29-32]</sup>。云南松苗木通过根系

进行养分的吸收和利用,养分都是从根部进行吸收从而作用到植物的各个部位,Weiner认为,施肥处理较对照的总根长、根系总体积、根系平均直径以及根系表面积均有所增加<sup>[33]</sup>,本研究也有相同的结果。光合作用是影响植物生长快慢的重要因素,适当施肥可以有效提高云南松的光合能力,有利于光合产物的形成与积累,并能促进叶绿素的形成<sup>[34-35]</sup>。叶片中的叶绿素含量能直接影响植物的光合能力,氮磷配施有利于苗木光合色素的形成<sup>[36]</sup>,与刘秀等的研究结果相似,叶绿素能够增强绿色植物光合作用,促进林木快速生长,从而提高苗木的质量和产量<sup>[37-38]</sup>。向光锋等认为,不同施肥

表 5 氮磷添加施肥对云南松根系形态的异速生长分析

参数	处理	相关生长指数(斜率)				等速生长检验(指数)	
		$r^2$	$P$	95% 置信区间	斜率( $b$ )	$F$	$P_{-1.0}$
根系总体积 - 总根长	1	0.129	0.485	[0.164, 1.406]	0.480ab	2.960	0.160
	2	0.000	0.990	[-1.325, -0.138]	-0.428b	3.654	0.128
	3	0.257	0.305	[-4.353, -0.573]	-1.580b	1.206	0.334
	4	0.187	0.392	[0.286, 2.333]	0.817ab	0.203	0.676
	5	0.983	0.000	[0.736, 1.053]	0.880a	3.881	0.120
	6	0.800	0.016	[0.396, 1.278]	0.711ab	2.422	0.195
	7	0.215	0.354	[-1.040, -0.131]	-0.369b	6.962	0.058
	8	0.035	0.723	[-2.610, -0.280]	-0.854b	0.104	0.764
	9	0.990	0.000	[0.386, 0.510]	0.444b	319.537	0.000
	无共同斜率	$t = 21.078$	$P = 0.006$				
根系表面积 - 根系平均直径	1	0.067	0.619	[-19.764, -2.177]	-6.559c	44.013	0.003
	2	0.368	0.202	[0.789, 5.310]	2.047a	3.843	0.122
	3	0.953	0.001	[1.077, 1.945]	1.448b	12.280	0.025
	4	0.021	0.783	[0.377, 3.556]	1.157b	0.088	0.782
	5	0.033	0.731	[-11.009, -1.178]	-3.601b	11.417	0.028
	6	0.089	0.566	[0.533, 4.749]	1.591b	1.016	0.370
	7	0.040	0.705	[0.430, 3.994]	1.310b	0.312	0.607
	8	0.451	0.144	[-9.530, -1.572]	-3.870b	23.780	0.008
	9	0.198	0.376	[-8.285, -1.028]	-2.919b	8.280	0.045
	有共同斜率	$t = 14.019$	$P = 0.071$				
根系平均直径 - 根系总体积	1	0.367	0.203	[0.109, 0.731]	0.282b	16.865	0.015
	2	0.031	0.738	[-1.766, -0.189]	-0.577d	1.378	0.306
	3	0.117	0.507	[-2.202, -0.253]	-0.747e	0.397	0.563
	4	0.071	0.611	[-2.164, -0.239]	-0.719e	0.486	0.524
	5	0.025	0.764	[-0.936, -0.100]	-0.305c	9.061	0.040
	6	0.166	0.422	[-2.776, -0.334]	-0.963e	0.007	0.939
	7	0.658	0.050	[0.435, 1.918]	0.914a	0.096	0.772
	8	0.880	0.006	[0.198, 0.501]	0.315a	68.174	0.001
	9	0.165	0.424	[-1.431, -0.172]	-0.496d	2.761	0.172
	有共同斜率	$t = 11.738$	$P = 0.145$				

配比对叶片的叶绿素含量有显著的效果<sup>[39]</sup>。本研究在中氮中磷情况下云南松叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素以及叶绿素总含量均有所增加。此外,生物量是评价苗木的重要内容之一,生长性状对生物量的贡献与作用均呈显著性,且生物量与生长性状之间的关系相对密切<sup>[40]</sup>。植物生物量分配是遗传差异与环境共同作用的结果,是植物对环境适应的体现<sup>[41]</sup>。本研究结果显示,不同施肥处理云南松苗木的生物量分配存在差异,各器官生物量的积累表现为叶 > 茎 > 根。刘际梅等对杉木进行研究,发现氮添加能有效促进杉木幼苗生物量的增加<sup>[42]</sup>,本研究也有相同的结论,说明中氮中磷施肥会显著促进云南松幼苗生物量的积累<sup>[43]</sup>。

通过异速生长方程可以看出植物的生长关系,从斜率中看出某物种或某一类物种部分与部分、部分与整体间的差异和对比关系<sup>[22,44]</sup>。张世航等在北美车前的研究中指出,各器官之间多为异速生长关系<sup>[45]</sup>。本研究在不同氮磷配比施肥下云南松苗木生长量、根系指标间的异速生长关系存在一定的差异。云南松苗木生长指标间无共同 SMA 斜率,说明异速生长轨迹发生了变化;在根系指标中除根系总体积 - 总根长之间无共同 SMA 斜率,其余指标均存在共同 SMA 斜率,说明它们之间异速生长轨迹并没有发生显著变化,当外界环境发生变化苗木能获得的生存资源也发生改变,苗木会对地下与地上的生长进行不断调整<sup>[46]</sup>。通过相关性分析可了解各

表6 云南松苗木生长量、根系形态和生物量的相关性分析

指标	相关系数											
	苗高	针叶长	地径	总根长	根系表面积	根系平均直径	根系总体积	根生物量	茎生物量	叶生物量	地上生物量	单株生物量
苗高	1.000											
针叶长	0.615 **	1.000										
地径	0.848 **	0.597 **	1.000									
总根长	0.472 **	0.348 **	0.430 **	1.000								
根系表面积	0.459 **	0.224	0.439 **	0.617 **	1.000							
根系平均直径	0.484 **	0.396 **	0.608 **	0.242	0.489 **	1.000						
根系总体积	0.450 **	0.285 *	0.459 **	0.648 **	0.557 **	0.329 *	1.000					
根生物量	0.776 **	0.622 **	0.818 **	0.504 **	0.354 **	0.491 **	0.446 **	1.000				
茎生物量	0.692 **	0.693 **	0.801 **	0.476 **	0.339 *	0.611 **	0.422 **	0.792 **	1.000			
叶生物量	0.587 **	0.621 **	0.690 **	0.337 *	0.292 *	0.558 **	0.357 **	0.530 **	0.779 **	1.000		
地上生物量	0.681 **	0.699 **	0.794 **	0.436 **	0.336 *	0.621 **	0.415 **	0.710 **	0.950 **	0.935 **	1.000	
单株生物量	0.769 **	0.721 **	0.863 **	0.495 **	0.368 **	0.617 **	0.458 **	0.875 **	0.960 **	0.848 **	0.962 **	1.000

注: \*\*、\* 分别表示极显著( $P < 0.01$ )、显著( $P < 0.05$ )相关。

性状指标间表现为正相关还是负相关,以及相关性程度<sup>[47]</sup>。本研究的结论与蔡年辉等的研究结果相似,各生长均揭示两两指标间正相关关系,且生长量、生物量之间存在明显的相互促进作用<sup>[40]</sup>。生长量、根系形态与生物量指标间呈现显著或极显著的正相关关系。施肥可以协调苗木地上部分和地下部分的生长,相比于地下部分,地上部分与各组分生物量的相关性均较大,同时施肥可以提高苗木地上部分和地下部分的生物量。苗木生长受到不同外源肥料的影响,不同肥料配比会导致苗木生长特性发生改变,包括异速生长模型改变等,且苗木各指标间有较强的联系,在苗木培育时要综合考虑,因时制宜、因地制宜,充分补足短板,更好的培育优质苗木。

### 3.2 结论

氮磷根系配施可以显著促进苗木生长,各处理的生长量、根系形态、光合色素、生物量等指标均高于对照组,施肥可以改变云南松苗木的生长轨迹,云南松苗木的异速生长关系不仅受到苗木生长量间和根系生长间的影响,同时,在不同处理间也存在差异。通过相关性分析可知,各指标间均呈现两两指标间的正相关关系。总之,在云南松幼苗生长发育阶段,氮磷混施的效果明显优于单施氮肥或单施磷肥,同时氮磷配比也要合适,过多或过少也起不到最适宜的作用,综合苗木各指标来看,本研究的最优处理为中氮中磷,即氮 0.4 g/株、磷 0.8 g/株

是云南松苗木生长过程中最能有效促进云南松苗木生长的组合肥料。

### 参考文献:

- [1] 郑万均,傅立国. 中国植物志:第七卷[M]. 北京:科学出版社,1978.
- [2] 罗方书,万国华,皮文书. 云南松地理种源研究 I. 苗期试验[J]. 云南植物研究,1987,9(4):427-435.
- [3] 《中国森林》编辑委员会. 中国森林:第2卷 针叶林[M]. 北京:中国林业出版社,1999.
- [4] 袁春明,郎南军,孟广涛,等. 长江上游云南松林水土保持生态效益的研究[J]. 水土保持学报,2002,16(2):87-90.
- [5] 孟丽媛,余婷,张辉红,等. 球果宿存对云南松出苗率及幼苗生长的影响[J]. 西部林业科学,2018,47(3):113-117,128.
- [6] 许玉兰,蔡年辉,陈诗,等. 云南松天然群体遗传变异与生态因子的相关性[J]. 生态学杂志,2016,35(7):1767-1775.
- [7] 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.
- [8] 束传林,廖声熙,李昆,等. 一平浪林场云南松单株木生长规律初步研究[J]. 陕西林业科技,2008(3):1-3.
- [9] 李丹,付玉嫔,杨卫,等. 不同氮磷水平对云南松幼苗光合生理及生物量的影响[J]. 安徽农业科学,2010,38(6):3217-3219,3230.
- [10] 佟志龙,贺莉莎,欧应花,等. 滇中高原云南松人工林营养元素积累及其分配格局[J]. 广西林业科学,2019,48(1):46-50.
- [11] 佟志龙,陈奇伯,王艳霞,等. 不同林龄云南松林营养元素积累与分配特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(6):100-106,114.
- [12] 汪梦婷,孙继伟,李亚麒,等. 不同苗龄云南松各器官生物量的分配特征研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2020,40

- (3):46-51.
- [13]王晶晶,陈奇凌,李 铭,等. 不同氮磷钾配施对滴灌红枣果实及植株养分含量的影响[J]. 江苏农业科学,2014,42(4):117-119.
- [14]戴开结,何 方,沈有信,等. 低磷胁迫下云南松幼苗的生物量及其分配[J]. 广西植物,2006,26(2):183-186.
- [15]郑小琴,陈文静,曹 凡,等. 配方施肥对薄壳山核桃苗期养分含量及光合作用的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(5):169-174.
- [16]王 楠,王宏信,李向林,等. 施肥对降香黄檀幼苗生长和光合的影响[J]. 东北林业大学学报,2017,45(1):25-29.
- [17]李 鑫,李 昆,段安安,等. 不同地理种源云南松幼苗生物量分配及其异速生长[J]. 北京林业大学学报,2019,41(4):41-50.
- [18]蔡年辉,唐军荣,车凤仙,等. 平茬高度对云南松苗木碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 生态学杂志,2022,41(5):849-857.
- [19]王 瑜,车凤仙,方 芳,等. 氮、磷叶面施肥对云南松苗木荫蔽的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2021,41(6):41-48.
- [20]Peters R H. The ecological implications of body size [M]. Cambridge:Cambridge University Press,1983.
- [21]Niklas K J. Size - dependent variations in plant growth rates and the “3/4 - power rule” [J]. American Journal of Botany, 1994, 81(2):134-144.
- [22]韩文轩,方精云. 幂指数异速生长机制模型综述[J]. 植物生态学报,2008,32(4):951-960.
- [23]Broadley M R, Escobar - Gutiérrez A J, Burns A, et al. What are the effects of nitrogen deficiency on growth components of lettuce? [J]. New Phytologist, 2000, 147(3):519-526.
- [24]韦 娜. 施肥对细叶云南松苗生长及生理影响[J]. 现代园艺, 2019(9):9-11.
- [25]李亚麒. 云南松苗木对不同氮磷配施的响应[D]. 昆明:西南林业大学,2021.
- [26]吴志庄,杨志和,厉月桥,等. 木本能源植物黄连木苗期生物量分配规律与构成因素分析[J]. 西北林学院学报,2015,30(6):28-32.
- [27]王益明,李瑞瑞,张 慧,等. 指数施肥对美国山核桃幼苗生物量及氮积累的影响[J]. 生态学杂志,2018,37(10):2920-2926.
- [28]李 博. 生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [29]刘修元,杜恩在,徐龙超,等. 落叶松原始林树木生长对氮添加的响应[J]. 植物生态学报,2015,39(5):433-441.
- [30]肖 迪,王晓洁,张 凯,等. 模拟氮沉降对五角枫幼苗生长的影响[J]. 北京林业大学学报,2015,37(10):50-57.
- [31]王建宇,王庆贵,闫国永,等. 原始云冷杉、红松林树木生长对氮沉降的响应[J]. 北京林业大学学报,2017,39(4):21-28.
- [32]蔡东升,杨文洁,段伊佩,等. 不同氮素形态及配比对番茄幼苗生长和生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(16):113-118.
- [33]刘士玲,陈 琳,杨保国,等. 氮磷肥对西南桦无性系生物量分配和根系形态的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019,43(5):23-29.
- [34]幸福梅,柳文杰,张兴强,等. 不同施肥方式对巨柏苗木生长及光合作用的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2022,61(5):880-887.
- [35]胡厚臻,侯文娟,潘启龙,等. 配方施肥对刨花润楠幼苗生长和光合生理的影响[J]. 西北林学院学报,2015,30(6):39-45.
- [36]张青青,周再知,王西洋,等. 施肥对柚木光合生理和叶绿素荧光特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2021,41(4):31-38.
- [37]刘 秀,廖宝文,李志辉,等. 不同氮磷钾含量的施肥配比对半年生杨叶肖槿苗木生长及生理的影响[J]. 西部林业科学, 2009,38(4):57-62.
- [38]常冀原,张 斌,许 琪,等. 氮、磷、钾对江南油杉形态及生理变化的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2015,35(5):46-50.
- [39]向光锋,颜立红,秦 喜,等. 氮磷钾配比施肥对厚果鸡血藤容器苗生长的影响[J]. 湖南林业科技,2020,47(3):90-97.
- [40]蔡年辉,王大玮,黄文学,等. 云南松苗木生长与生物量的相关性及其通径分析[J]. 植物研究,2019,39(6):853-862.
- [41]李亚麒,孙继伟,李江飞,等. 云南松不同家系苗木生物量分配及其异速生长[J]. 北京林业大学学报,2021,43(8):18-28.
- [42]刘际梅,杨 斌,袁莲珍,等. 不同施肥对杉木容器苗生长及生物量的影响研究[J]. 林业调查规划,2022,47(2):123-127.
- [43]Oliet J A, Planelles R, Artero F, et al. Field performance of *Pinus halepensis* planted in Mediterranean arid conditions: relative influence of seedling morphology and mineral nutrition [J]. New Forests, 2009, 37(3):313-331.
- [44]Weiner J. Allocation, plasticity and allometry in plants [J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2004, 6(4):207-215.
- [45]张世航,龚 莉,戈玉莹,等. 不同密度下入侵植物北美车前生物量分配与异速生长关系[J]. 草业科学, 2021, 38(10):1938-1949.
- [46]王 丹,李熙颜,颜廷雨,等. 不同季节平茬对云南松生物量分配与异速生长的影响[J]. 西南农业学报,2023,36(1):47-52.
- [47]杨 珍,李 斌,赵 军,等. 甜高粱主要农艺性状与产量相关和通径分析[J]. 中国糖料,2018,40(4):16-19.