·森林资源建设与保护 Construction and Protection of Forest Resources·

叶面施肥与土壤施肥对红松球果与种实品质的影响

李欣月，杨秀博，朱美如，李明月，张鹏*
（东北林业大学 林学院，森林生态系统可持续经营教育部重点实验室，哈尔滨 150040）

摘　要：探究不同施肥处理组合对红松球果和种实形态以及营养成分的影响，筛选出适宜红松林的最佳施肥方案，为红松果林的科学施肥提供理论依据和实践指导。以52年生红松人工林为研究对象，采用双因素裂区设计，设置叶面施肥（氨基酸水溶肥）3个体积分数水平（0%、0.1%、0.2%），分别为不喷施（F1）、低体积分数（F2）与高体积分数（F3），土壤施肥（尿素，N 46%）4个梯度水平（0、50、100、150 kg N/hm^2），分别为不施肥（S1）、低施肥量（S2）、中施肥量（S3）和高施肥量（S4），共计12个处理，研究不同施肥处理组合对红松球果产量、种子形态和产量、种仁的可溶性糖、可溶性蛋白、油脂质量分数及磷钾质量分数的影响，并结合相关性分析、主成分分析及经济效益分析，对施肥效果进行综合评价。结果表明，叶面施肥处理可显著提高红松球果干质量、单株球果产量与种子产量、种仁可溶性蛋白质量分数。随着叶面施肥体积分数升高，球果干质量、单株球果产量与种子产量、种仁可溶性蛋白质量分数显著升高，F3S2处理的效果最佳，分别比对照增加31.5%、3.45 kg、0.92 kg、47.75%；单独土壤施肥对种仁油脂合成无显著促进作用，低体积分数叶面施肥（F2）单独施用（F2S1处理）或与低量土壤施肥（S2）配施（F2S2处理），均可显著提高油脂质量分数9.1%~9.6%。主成分分析表明，F3S2处理的红松种实品质综合评分最高。对不同施肥处理下红松的种子净收益进行分析发现，F3S2处理的净收益最高，种子净收益为35 693.62元/hm^2，F3S1处理的种子净收益排名第二，为30 175.67元/hm^2。叶面与土壤协同施肥会进一步提高红松球果产量并促进营养物质积累，若要同时增加经济收益和种实品质，建议采用高体积分数（0.2%）叶面施肥与低施肥量（50 kg N/hm^2）土壤施肥组合，如果考虑到施肥便利与成本因素，可单独采用高体积分数（0.2%）叶面施肥处理。

关键词：红松；叶面施肥；土壤施肥；种实品质；营养成分
中图分类号：S725.5　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.7525/j.issn.1006-8023.2026.05.010

Effects of Foliar and Soil Fertilization on Cone and Seed Quality of *Pinus koraiensis*

LI Xinyue, YANG Xiubo, ZHU Meiru, LI Minyue, ZHANG Peng*
(Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management Ministry of Education, College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of different combined fertilization treatments on the morphology and nutrient composition of *Pinus koraiensis* cones and seeds, to identify the optimal fertilization regime for *Pinus koraiensis* nut forests, and to provide a theoretical basis and practical guidance for scientific fertilization. A 52-year-old *Pinus koraiensis* plantation was used as the research subject. Three levels of foliar fertilization (amino acid water-soluble fertilizer: 0%, 0.1%, and 0.2%) were designated as no spraying (F1), low-concentration (F2), and high-concentration (F3) foliar fertilization, and four levels of soil fertilization (urea: 0, 50, 100, and 150 kg N·hm^{-2}) were designated as no fertilization (S1), low rate (S2), medium rate (S3), and high rate (S4) soil fertilization, resulting in a total of 12 treatment combinations. The effects of these different fertilization combinations on cone yield, seed morphology and yield, and kernel contents of soluble sugars, soluble protein, oil, phosphorus, and potassium were investigated. A com-

收稿日期：2026-05-07
基金项目：国家重点研发计划项目(2024YFD2200604)；中央高校基本科研业务费专项资金资助(2572023CT02)。
第一作者简介：李欣月，硕士研究生。研究方向为森林培育。E-mail：lixinyue2023120120@163.com
***通信作者：**张鹏，博士，教授。研究方向为森林培育。E-mail：zhangpeng@nefu.edu.cn。
引文格式：李欣月，杨秀博，朱美如，等. 叶面施肥与土壤施肥对红松球果与种实品质的影响[J]. 森林工程，2026，42(5)：986-997.
Li Xinyue, Yang Xiubo, Zhu Meiru, et al. Effects of foliar and soil fertilization on cone and seed quality of *Pinus koraiensis*[J]. Forest Engineering, 2026, 42(5): 986-997.

prehensive evaluation of fertilization efficiency was conducted using correlation analysis, principal component analysis, and economic benefit analysis. The results showed that foliar fertilization significantly increased cone dry weight, per-tree cone and seed yield, and kernel soluble protein content. As foliar fertilizer concentration increased, these parameters increased significantly, with the F3S2 treatment showing the best performance, achieving increases of 31.5% in cone dry weight, 3.45 kg in per-tree cone yield, 0.92 kg in per-tree seed yield, and 47.75% in kernel soluble protein content compared with the control. Soil fertilization alone did not significantly promote kernel oil synthesis. However, low-concentration foliar fertilization (F2) applied alone (F2S1) or combined with low-rate soil fertilization (F2S2) significantly increased oil content by 9.1% to 9.6%. Principal component analysis showed that the F3S2 treatment achieved the highest comprehensive score for cone and seed quality. Analysis of net seed income revealed that the F3S2 treatment had the highest net income (35,693.62 CNY·hm^{-2}), followed by the F3S1 treatment (30,175.67 CNY·hm^{-2}). In conclusion, combined foliar and soil fertilization further enhanced cone yield and promoted nutrient accumulation. To maximize both economic returns and seed quality, the combination of high-concentration (0.2%) foliar fertilization and low-rate (50 kg N·hm^{-2}) soil fertilization is recommended. If application convenience and cost are primary concerns, high-concentration (0.2%) foliar fertilization alone can be used as an alternative.

Keywords: *Pinus koraiensis*; foliar fertilization; soil fertilization; cone and seed quality; nutrient composition

0　引言

为践行大食物观与构建多元化食物供给体系,木本粮食树种资源的培育与利用备受重视。红松(*Pinus koraiensis*)作为我国东北地区的珍贵用材树种,也是优质食用坚果树种,具有极高的生态和经济价值。种子富含粗蛋白质、油脂、粗纤维、多糖、不饱和脂肪酸以及人体所需的矿物质等微量元素[1-3],尤其是松籽油质量分数高且具有降血脂与抗肿瘤等医疗保健作用[4-5]。

红松存在明显的"大小年"结实现象,结实大年生殖枝与营养枝中的氮质量分数会显著降低,结实小年枝叶中氮虽有积累,但积累不足导致无法连续大量结实[6],从而红松球果质量和产量下降[7]。以往研究认为,树体缺乏营养物质而限制生长结实等问题可以通过施肥处理解决[8-9],30 年生的日本落叶松(*Larix kaempferi*)嫁接无性系施加不同配比的氮磷钾土壤肥后,种子千粒质量提高了30%[10],当N、P、K比例调整为2∶1∶6时,0.5~1.0 kg/株施肥量可提高白檀(*Symplocos paniculata*)果实产量和油脂质量分数[11]。有研究发现,随着红松林龄增加,人工林林分生长受氮素限制明显[12],施加氮肥能显著促进红松的营养生长和开花结实[13-15]。

近年来,氨基酸水溶肥在农作物上应用的相关研究报道较多[16-17],其作为叶面肥料不仅具有易被植物吸收利用、增强植株生理生化功能、加速干物质形成与积累等作用[18],而且通过植物蛋白酶解得到的氨基酸种类更贴近植物的氨基酸谱,容易被植物吸收利用,其活性较高[19]。氨基酸叶面肥处理杂柑(*Hongmeiren citrus*)[20]、枇杷(*Eriobotrya japonica*)[21]后可显著提高单果质量、果实横径和纵径。叶面喷施氨基酸肥料也会促进坚果类果实营养物质积累,榛子(*Corylus* spp.)果实的葡萄糖、蔗糖、果糖质量分数较对照提升近50%,并增加了果实矿质元素质量分数[22]。

目前,关于土壤施氮肥与叶片喷施氨基酸水溶肥共同提高林木种实品质的研究较少,两者协同施用是否会进一步提高红松球果产量并促进营养物质积累尚待探究。本研究以52年生红松人工林为研究对象,采用不同施肥量的尿素(土壤施肥)和不同体积分数的氨基酸水溶肥(叶面施肥)组合进行配施,分析不同施肥处理对红松球果、种子形态和产量以及红松种仁的可溶性糖、可溶性蛋白、油脂、矿质元素质量分数的影响,并结合相关性分析、主成分分析及经济效益分析,对施肥效果进行综合评价,旨在确定同时提高红松种实品质及红松坚果林经济效益的最佳施肥处理,为红松经济林高效培育与经营提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况与试验材料

试验地位于黑龙江省七台河市勃利县红旗林场(45°42′N,130°21′E),该区域属长白山山系老爷岭余脉,低山丘陵地貌,气候类型为温带季风气候,年均气温为2.3 ℃,年≥10 ℃活动积温为2 100 ℃,年降水量600 mm,无霜期为110 d。以1972年营造的红松人工林为研究对象,试验林位于阳坡,坡度为12°,海拔约340 m,现林分密度为430株/hm^2,平均树高为13.4 m,平均胸径为31.3 cm。土壤类型为暗棕壤,有机质质量分数为24.6 g/kg,碱解氮质量分数为174.11 mg/kg,有效磷质量分数为24.44 mg/kg,速效钾质量分数为45.77 mg/kg。

1.2　试验设计

试验采用双因素裂区试验设计,设置叶面施肥和土壤施肥2种施肥方式对红松结实母树进行施肥处理。主区因素为叶面施肥,选用"加倍隆"氨基酸水溶

肥(购自天津华宇农药有限公司,其中游离氨基酸100 g/L,铜0.5 g/L,锰5 g/L,锌1.5 g/L,硼13 g/L),设置3个体积分数水平(0%、0.1%、0.2%),分别为不喷施(F1)、低体积分数(F2)与高体积分数(F3)。利用大疆T 50无人机进行喷施,于2024年5月上旬开始,每隔15 d喷施一次,共计喷施6次,每公顷用水量100 L。

副区因素为土壤施肥,选用尿素(N 46%),设置4个梯度水平(0、50、100、150 kg N/hm^2),分别为不施肥(S1)、低施肥量(S2)、中施肥量(S3)和高施肥量(S4)。同时,每个样地均配合添加30 kg过磷酸钙(P_2O_5 18%)以补充磷肥,于2024年5月上旬通过林木行间沟施方法一次性施入,施肥点离林木3~4 m,施肥深度20 cm。试验共计12个处理,见表1,每处理设置3块20 m×30 m样地作为重复,每块样地内随机选择2株生长、结实状况均匀一致的红松母树于2024年9月下旬进行球果采收,用于后续测定和分析。

表1 红松综合施肥试验方案

Tab. 1 Scheme of fertilization experiment on *Pinus koraiensis*

叶面施肥/% foliar fertilization	土壤施肥/(kg N·hm^{-2}) soil fertilization	处理简称 treatment abbreviation
F1 (0%,不喷施) F1 (0%, no spraying)	S1 (0,不施肥)	F1S1(未施肥,对照)
	S2 (50,低施肥量)	F1S2
	S3 (100,中施肥量)	F1S3
	S4 (150,高施肥量)	F1S4
F2 (0.1%,低体积分数) F2 (0.1%, low-concentration)	S1 (0,不施肥)	F2S1
	S2 (50,低施肥量)	F2S2
	S3 (100,中施肥量)	F2S3
	S4 (150,高施肥量)	F2S4
F3 (0.2%,高体积分数) F3 (0.2%, high-concentration)	S1 (0,不施肥)	F3S1
	S2 (50,低施肥量)	F3S2
	S3 (100,中施肥量)	F3S3
	S4 (150,高施肥量)	F3S4

1.3 指标测定

1.3.1 球果与种子形态和质量测定

对采集的红松球果测定其鲜质量,将球果风干后测定其干质量。每个处理随机选取800粒种子进行千粒质量(百粒法)的测定,再从中随机选择150粒种子,进行种子长、种子宽、种仁长、种仁宽的测定;其中种子形态利用游标卡尺(精确到0.01 mm)进行测定,并将数据记录下来;球果鲜质量、球果干质量、种子千粒质量利用电子天平(精确到0.000 1 g)进行测定。

1.3.2 种仁营养成分测定

油脂质量分数采用索氏提取法进行测定,脱脂种仁样品用于糖类物质和矿质元素质量分数的测定。可溶性蛋白质量分数利用考马斯亮蓝G-250染色法测定,可溶性糖和淀粉质量分数采用蒽酮比色法测定。烘干种仁样品经硫酸-高氯酸消解后,采用钼锑抗分光光度计法测定种子的磷质量分数(P,mg/g),使用火焰光度计测定种子的钾质量分数(K,mg/g)。

1.3.3 经济效益核算

红松种植密度为430 株/hm^2。红松种子价格参考黑龙江省牡丹江市2025年松子价格40~60 元/kg,取平均值50 元/kg进行经济效益核算。施肥成本如下。

肥料单价:尿素为2.75 元/kg,氨基酸水溶肥原液为42 元/L,过磷酸钙为4.5 元/kg。施肥与人工成本:无人机叶面施肥与人工费用为83 元/hm^2,土壤施肥机器与人工费用为231 元/hm^2。

各处理的经济效益计算公式为

种子产值(元/hm^2)=每公顷种子质量×种子单价。 (1)

施肥总成本(元/hm^2)=(每公顷肥料用量×肥料单价)+施肥与人工成本。 (2)

种子净收益(元/hm^2)=产值-施肥总成本。 (3)

1.4 数据分析

利用SPSS 22对数据进行分析处理,采用双因素方差分析(two-way analysis of variance,two-way ANOVA)探究叶面施肥与土壤施肥对球果质量、种子形态和营养成分的主效应和交互作用,若交互作用或主效应显著,则采用LSD法进行事后多重比较,显著性水平设为α=0.05。对球果和种子品质指标进行主成分分析(principal component analysis,PCA),提取特征值>1的主成分进行综合评价。利用Origin 2021进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对红松球果产量的影响

叶面施肥和土壤施肥的交互作用以及土壤施肥对红松球果产量影响不显著(P>0.05),但叶面施肥对单个球果鲜质量、单个球果干质量及单株球果产量影响显著(P<0.05),见表2。

不同叶面施肥体积分数与土壤施肥量对红松质量的影响不同。在不喷施叶面肥的条件下,随着土壤施肥量的提高,球果鲜质量和干质量呈现先升后降的趋势,在中等施肥量时分别达到最大值(290.83、162.83 g),显著高于对照(P<0.05),分别较对照增加59.21%、27.21%。而在低体积分数、高体积分数叶面肥时,不

表 2　叶面施肥和土壤施肥对红松球果产量的主效应和交互效应

Tab. 2 Main effects and interaction effects of foliar fertilization and soil fertilization on cone yield of *Pinus koraiensis*

变异来源 source of variation	单个球果鲜质量/g cone fresh weight	单个球果干质量/g cone dry weight	单株球果数量/个 number of cones per tree	单株球果产量/kg cone yield per tree	出种率/% kernel recovery percent
叶面施肥 foliar fertilization	0.016	<0.001	0.804	0.044	0.509
土壤施肥 soil fertilization	0.072	0.458	0.287	0.606	0.258
叶面施肥 × 土壤施肥 F × S	0.093	0.400	0.461	0.642	0.509

同土壤施肥量对球果鲜质量和干质量无显著影响。在同一土壤施肥量的条件下,随着叶面施肥体积分数升高,球果鲜质量和干质量均呈现上升趋势,在高体积分数叶面施肥时达到最大值(283. 83、183. 00 g),显著高于不喷施叶面肥处理(P<0. 05),分别较对照增加了55. 38%、42. 97%,见表3。

表 3　不同施肥处理对红松球果产量的影响

Tab. 3 The effects of different fertilization treatments on cone yield of *Pinus koraiensis*

叶面施肥 foliar fertilization	土壤施肥 soil fertilization	单个球果鲜质量/g cone fresh weight	单个球果干质量/g cone dry weight	单株球果数量/个 number of Cones per tree	单株球果产量/kg cone yield Per tree	出种率/% kernel recovery percent
F1	S1	182.67 ± 17.38 c	128.00 ± 7.02 c	13.07 ± 3.05 a	2.16 ± 0.28 b	41.28 ± 4.06
	S2	232.00 ± 20.01 abc	154.67 ± 7.25 abc	9.31 ± 1.35 a	2.16 ± 0.32 b	32.65 ± 3.72
	S3	290.33 ± 14.93 a	162.83 ± 9.57 ab	8.39 ± 1.54 a	2.66 ± 0.16 ab	36.96 ± 1.62
	S4	216.50 ± 15.93 bc	135.67 ± 6.32 bc	13.33 ± 1.75 a	2.91 ± 0.25 ab	36.06 ± 2.70
F2	S1	238.50 ± 10.91 abc	158.17 ± 14.34 abc	13.42 ± 3.02 a	3.14 ± 0.22 ab	31.64 ± 2.00
	S2	245.17 ± 17.94 abc	168.33 ± 13.14 ab	14.23 ± 5.87 a	3.39 ± 0.23 ab	34.15 ± 3.06
	S3	243.97 ± 13.28 abc	163.83 ± 6.24 ab	8.96 ± 0.49 a	2.20 ± 0.28 b	36.91 ± 0.16
	S4	282.37 ± 19.58 ab	167.83 ± 4.94 ab	12.13 ± 1.14 a	3.40 ± 0.27 ab	31.55 ± 0.98
F3	S1	267.33 ± 22.26 ab	181.83 ± 9.10 a	16.88 ± 6.13 a	4.36 ± 0.39 ab	38.20 ± 3.91
	S2	260.17 ± 30.97 ab	168.33 ± 17.92 ab	21.63 ± 5.54 a	5.16 ± 0.30 a	36.83 ± 1.81
	S3	279.33 ± 21.32 ab	183.00 ± 11.02 a	12.75 ± 3.18 a	3.43 ± 0.32 ab	35.36 ± 2.21
	S4	283.83 ± 27.79 a	182.33 ± 11.98 a	11.35 ± 3.31 a	2.95 ± 0.31 ab	32.93 ± 0.58

注:数值为平均值±标准误差。同列不同字母表示不同施肥处理间差异显著(P<0. 05)。下同

Note: Values in the table are presented as mean ± standard error. Different letters within the same column indicate significant differences among treatments at the same fertilization concentration (P<0. 05). The same below.

在不喷施叶面肥的条件下,随着土壤施肥量的提高,单株球果产量呈现上升的趋势,在高施肥量时达到最大值(2. 91 kg),显著高于对照(P<0. 05),较对照增加0. 75 kg。而在低、高体积分数叶面施肥时,随着土壤施肥量的提高,单株球果产量呈现先升后降的趋势。在不施土壤肥与低土壤施肥量的条件下,随着叶面施肥体积分数升高,单株球果产量总体上呈现上升趋势,而在土壤中、高施肥量的条件下,随着叶面施肥体积分数升高,单株球果产量呈现先升后降的趋势,在F3S2处理时达到最大值(5. 16 kg),显著高于对照组(P<0. 05),较对照组增加3. 45 kg。

2. 2　不同施肥处理对红松种子品质的影响

叶面施肥和土壤施肥的交互作用对红松种子形态影响均显著(P<0. 05),但对种子千粒质量和单株种子产量影响不显著(P>0. 05);土壤施肥对种子千粒质量和单株种子产量影响均不显著(P>0. 05),叶面施肥对种子千粒质量影响均不显著(P>0. 05),但对单株种子产量影响显著(P<0. 05),见表4。

表 4 叶面施肥与土壤施肥对红松种子形态和产量的主效应和交互效应

Tab. 4 Main effects and interaction effects of foliar fertilization and soil fertilization on seed morphology and yield of *Pinus koraiensis*

变异来源 source of variation	自由度 degrees of freedom	种子长/mm seed length	种子宽/mm seed width	种仁长/mm kernel length	种仁宽/mm kernel width	千粒质量/g thousand-seed weight	单株种子产量/kg seed yield per tree
叶面施肥 foliar fertilization	3	0.041	0.427	0.019	<0.001	0.578	0.023
土壤施肥 soil fertilization	4	0.006	0.681	0.025	0.014	0.659	0.542
叶面施肥 × 土壤施肥 F × S	12	0.011	<0.001	0.001	<0.001	0.093	0.512

不同叶面施肥体积分数与土壤施肥量对红松种子长的影响不同。在不喷施叶面肥的条件下，随着土壤施肥量的提高，种子长呈现先升后降的趋势，在中施肥量时达到最大值（17.30 mm），显著高于对照（P<0.05），较对照增加12.41%。而在低、高体积分数叶面肥时，不同土壤施肥量对种子长无显著影响。在不施土壤肥与低施肥量的条件下，随着叶面施肥体积分数升高，种子长总体上呈现上升趋势，而在中施肥量的条件下，随着叶面施肥体积分数升高，种子长呈现先降后升的趋势，而在高施肥量的条件下，随着叶面施肥体积分数升高，种子长呈现上升的趋势，在F3S3处理下种子长较高，较对照增加10%，见表5。

表 5 不同施肥处理对红松种子形态和产量的影响

Tab. 5 Effects of different fertilization treatments on seed morphology of *Pinus koraiensis*

叶面施肥 foliar fertilization	土壤施肥 soil fertilization	种子长/mm seed length	种子宽/mm seed width	种仁长/mm kernel length	种仁宽/mm kernel width	千粒质量/g thousand-seed weight	单株种子产量/kg seed yield per tree
F1	S1	15.39 ± 0.07 d	10.00 ± 0.03 ef	12.91 ± 0.06 bcd	6.79 ± 0.04 bcde	611.17 ± 48.88 a	0.89 ± 0.10 b
	S2	16.73 ± 0.76 ab	11.04 ± 0.11 a	13.33 ± 0.43 abcd	7.24 ± 0.05 a	681.89 ± 19.57 a	0.77 ± 0.09 b
	S3	17.30 ± 0.20 a	10.55 ± 0.04 bcd	13.74 ± 0.27 a	6.77 ± 0.04 bcde	670.78 ± 24.87 a	0.77 ± 0.07 b
	S4	15.63 ± 0.07 cd	10.36 ± 0.04 cde	12.12 ± 0.17 e	6.92 ± 0.05 bc	586.61 ± 14.29 a	1.05 ± 0.07 ab
F2	S1	16.21 ± 0.05 bcd	10.96 ± 0.08 ab	12.76 ± 0.21 d	6.94 ± 0.13 b	702.87 ± 39.08 a	1.05 ± 0.08 ab
	S2	16.28 ± 0.10 bcd	10.45 ± 0.03 cde	13.18 ± 0.04 abcd	6.60 ± 0.02 ef	583.49 ± 39.52 a	1.08 ± 0.07 ab
	S3	16.09 ± 0.07 bcd	10.51 ± 0.11 bcd	12.84 ± 0.07 cd	6.67 ± 0.02 e	621.93 ± 33.87 a	0.78 ± 0.07 b
	S4	15.74 ± 0.23 cd	10.09 ± 0.29 def	13.34 ± 0.14 abcd	6.88 ± 0.07 bcd	621.00 ± 48.04 a	1.10 ± 0.07 ab
F3	S1	16.43 ± 0.12 abc	10.62 ± 0.13 abc	13.29 ± 0.14 abcd	6.45 ± 0.07 f	653.62 ± 22.57 a	1.53 ± 0.10 ab
	S2	16.34 ± 0.40 bc	9.87 ± 0.31 f	13.44 ± 0.20 abc	6.73 ± 0.06 cde	626.38 ± 34.07 a	1.81 ± 0.10 a
	S3	16.92 ± 0.17 ab	10.33 ± 0.09 cdef	13.53 ± 0.20 ab	6.73 ± 0.05 cde	668.19 ± 19.18 a	1.21 ± 0.10 ab
	S4	16.71 ± 0.12 ab	10.68 ± 0.18 abc	13.35 ± 0.12 abcd	6.71 ± 0.03 de	678.52 ± 45.15 a	1.01 ± 0.08 ab

在不喷施叶面肥的条件下，随着土壤施肥量的提高，种子宽呈现先升后降的趋势，在低施肥量时达到最大值（11.04 mm），显著高于对照（P<0.05），较对照增加10.4%。而在低、高体积分数叶面肥时，不同土壤施肥量对种子宽无显著影响。在不施土壤肥的条件下，随着叶面施肥体积分数升高，种子宽呈现上升趋势，在低施肥量的条件下，随着叶面施肥体积分数升高，种子宽呈现下降的趋势，而在中、高施肥量的条件下，不同体积分数叶面肥对种子长无显著影响，在F3S4处理时种子宽较高，较对照显著增加6.8%。

种仁形态指标与种子形态指标变化规律相似，F1S3施肥处理与F3S3处理显著提高了种仁长度，当施加F1S4处理（高土壤施肥量）时，显著降低种仁长度。F1S2处理能够显著促进种仁宽。同一叶面施肥体积

分数下,不同土壤施肥量对红松单株种子产量无显著影响。在同一土壤施肥量下,随着叶面肥体积分数的增加,单株种子产量总体上呈现上升趋势,均在高体积分数叶面肥下较高,F3S2处理单株种子产量达到最大值(1.81 kg),显著高于不喷施叶面肥处理(P<0.05),单株种子产量较对照增加0.92 kg。

2.3　不同施肥处理对红松种仁营养成分的影响

叶面施肥对红松种仁的可溶性糖、可溶性蛋白、油脂、磷与钾质量分数影响显著(P<0.05),土壤施肥对可溶性蛋白、油脂、磷与钾质量分数影响显著(P<0.05),两者交互作用对油脂质量分数影响极显著(P<0.001),见表6。

表6　叶面施肥与土壤施肥对红松种仁营养物质的主效应和交互效应

Tab. 6　Main effects and interaction effects of foliar fertilization and soil fertilization on kernel nutrients of *Pinus koraiensis*

变异来源 source of variation	自由度 degrees of freedom	可溶性糖质量分数/(mg·g^{-1}) soluble sugar content	可溶性蛋白质量分数/(mg·g^{-1}) soluble protein content	油脂质量分数/% oil content	磷质量分数/(mg·g^{-1}) phosphorus content	钾质量分数/(mg·g^{-1}) potassium content
叶面施肥 foliar fertilization	3	0.012	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
土壤施肥 soil fertilization	4	0.688	<0.001	0.008	<0.001	<0.001
叶面施肥×土壤施肥 F×S	12	0.853	0.208	<0.001	0.210	0.077

同一叶面肥体积分数下,随着土壤施肥量的增加,种仁的可溶性蛋白质量分数呈现上升趋势。在同一土壤施肥量下,随着叶面肥体积分数的增加,可溶性蛋白质量分数也呈现上升趋势,在F3S2处理时达到最大值,为107.89 mg/g,显著高于对照(P<0.05),较对照增加47.75%,见表7。

表7　叶面施肥与土壤施肥处理对红松种仁营养物质的影响

Tab. 7　Effects of foliar fertilization and soil fertilization treatments on kernels nutrient contents of *Pinus koraiensis*

叶面施肥 foliar fertilization	土壤施肥 soil fertilization	可溶性糖质量分数/(mg·g^{-1}) soluble sugar content	可溶性蛋白质量分数/(mg·g^{-1}) soluble protein content	油脂质量分数/% oil content	磷质量分数/(mg·g^{-1}) phosphorus content	钾质量分数/(mg·g^{-1}) potassium content
F1	S1	12.54 ± 0.95 a	73.02 ± 3.84 c	66.35 ± 0.97 bc	4.66 ± 0.21 bcd	13.61 ± 0.75 a
	S2	11.64 ± 0.93 a	82.83 ± 3.00 bc	67.17 ± 1.30 bc	4.22 ± 0.14 cde	12.32 ± 0.36 b
	S3	13.27 ± 0.56 a	82.46 ± 2.21 bc	60.52 ± 1.15 d	4.81 ± 0.39 bc	11.99 ± 0.56 bc
	S4	12.85 ± 1.02 a	85.91 ± 2.03 bc	70.45 ± 2.25 abc	4.28 ± 0.22 cde	10.45 ± 0.39 de
F2	S1	13.25 ± 2.34 a	87.30 ± 3.06 bc	72.43 ± 1.45 a	5.30 ± 0.17 a	11.88 ± 0.16 bc
	S2	12.09 ± 1.78 a	85.51 ± 3.46 bc	72.72 ± 0.93 a	4.56 ± 0.21 bcd	11.48 ± 0.20 bcd
	S3	12.88 ± 0.41 a	94.50 ± 2.86 ab	70.97 ± 1.72 ab	5.12 ± 0.08 ab	11.07 ± 0.26 bcde
	S4	14.49 ± 0.87 a	97.53 ± 1.50 ab	66.01 ± 2.40 bc	4.15 ± 0.18 cde	9.83 ± 0.17 e
F3	S1	14.35 ± 0.43 a	97.60 ± 1.97 ab	66.33 ± 0.58 bc	4.43 ± 0.18 cd	11.38 ± 0.26 bcd
	S2	15.60 ± 0.51 a	107.89 ± 3.65 a	66.94 ± 2.42 bc	4.18 ± 0.13 cde	11.04 ± 0.36b cde
	S3	15.56 ± 1.48 a	107.52 ± 3.01 a	65.28 ± 2.45 c	4.01 ± 0.16 de	11.29 ± 0.36 bcd
	S4	15.07 ± 0.91 a	105.51 ± 3.51 a	58.64 ± 0.56 d	3.74 ± 0.12 e	10.69 ± 0.33 cde

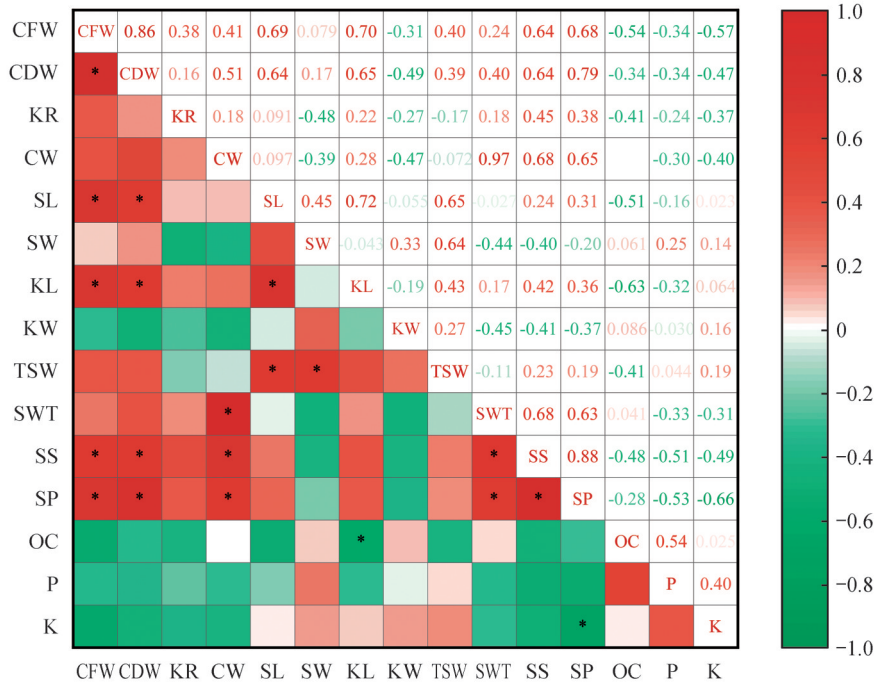
在不喷施叶面肥的条件下,随着土壤施肥量的提高,油脂质量分数呈现先降后升的趋势,而在低、高体积分数叶面肥时,随着土壤施肥量的提高,油脂质量分数呈现下降的趋势。在不施土壤肥和低、中土壤施肥量的条件下,随着叶面施肥体积分数升高,油脂质量分数总体上呈现先升后降趋势,而在高施肥量的条件下,

随着叶面施肥体积分数升高，油脂质量分数呈现下降的趋势，油脂质量分数在F2S2处理后达到最大值，为72.43%，较对照增加9.16%。

同一叶面肥体积分数下，随着土壤施肥量的增加，种仁的磷质量分数总体上呈现下降趋势。在同一土壤施肥量下，随着叶面施肥体积分数的增加，磷质量分数总体上呈现先升后降趋势，低体积分数叶面肥与低、中土壤施肥量结合施用有利于种仁磷质量分数的积累，而高体积分数叶面肥与高土壤施肥量结合施用则会降低磷质量分数。种仁钾质量分数随叶面施肥体积分数和土壤施肥量的增加均呈现下降趋势。

2.4 红松球果和种子品质的综合评价

单株球果鲜质量与单株球果干质量呈显著正相关关系（$P<0.05$），与种子长、种仁长呈显著正相关，与种仁可溶性糖质量分数、可溶性蛋白质量分数呈显著正相关。单株球果产量与单株种子产量呈显著正相关，与可溶性糖质量分数、可溶性蛋白质量分数呈显著正相关；并且可溶性糖质量分数与可溶性蛋白质量分数之间也呈显著正相关。种子长、种子宽均与千粒质量显著正相关。油脂质量分数与种仁长呈显著负相关，可溶性蛋白质量分数与钾质量分数呈显著负相关，见图1。



CFW：单个球果鲜质量；CDW：单个球果干质量；KR：出种率；CW：单株球果产量；SL：种子长；SW：种子宽；KL：种仁长；KW：种仁宽；TSW：千粒质量；SWT：单株种子产量；SS：可溶性糖质量分数；SP：可溶性蛋白质量分数；OC：油脂质量分数；P磷质量分数；K钾质量分数；*. $P<0.05$。

CFW: cone fresh weight; CDW: cone dry weight; KR: kernel recovery percent; CW: cone yield per tree; SL: seed length; SW: seed width; KL: kernel length; KW: kernel width; TSW: thousand-seed weight; SWT: seed yield per tree; SS: soluble sugar content; SP: soluble protein content; OC: oil content; P: phosphorus content; K: potassium content; *. $P<0.05$.

图1 球果与种子品质指标的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of cone and seed quality indicators

主成分分析前对数据进行预处理与适用性检验，避免多重共线性导致的偏差，并计算所有变量间的皮尔逊相关系数矩阵，剔除相关系数大于0.74的高度冗余变量，保留单株球果鲜质量、出种率、千粒质量、可溶性糖、可溶性蛋白、油脂质量分数6个指标。随后，对处理后的变量集进行了主成分分析的适用性评估。KMO（Kaiser-Meyer-Olkin）检验值为0.62，巴特利特球形检验结果显著（$\chi^2=29.84$，$P<0.05$），说明变量适合进行主成分分析。

提取的前2个主成分的特征值分别为3.215和1.221，其方差贡献率分别为53.589%和20.356%，累计贡献率达到73.943%，表明这2个主成分能够较好地覆盖6个指标的全部信息，见表8。其中第一主成分中单株球果鲜质量、可溶性糖、可溶性蛋白质量分数具有较大的正向载荷，分别为0.858、0.894、0.842，油脂质量分数具有较大的负向载荷（−0.694）；第二主成分中，出种率具有较大的正向载荷（0.601），千粒质量具有较大的负向载荷（−0.854），其余指标的载荷绝对值均小于0.3，见表9。

表8　各主成分及综合得分汇总

Tab. 8 Summary of principal components and comprehensive scores

成分 Component	特征值 Eigenvalue		
	总计 Tota	方差百分比/% Variance	累积/% Cumulative
1	3.215	53.586	53.586
2	1.221	20.356	73.943
3	0.838	13.964	87.906
4	0.347	5.776	93.683
5	0.304	5.075	98.757
6	0.075	1.243	100.000

表9　球果与种子品质指标主成分分析载荷系数

Tab. 9 Load factors of principal components for cone and seed quality traits

指标 index	载荷系数 load factor		公因子方差 common factor variance
	第一主成分 PC 1	第二主成分 PC 2	
单株球果鲜质量 cone fresh weight	0.858	−0.129	0.752
出种率 kernel recovery percent	0.572	0.601	0.688
千粒质量 thousand-seed weight	0.403	−0.854	0.893
可溶性糖质量分数 soluble sugar content	0.894	0.150	0.821
可溶性蛋白质量分数 soluble protein content	0.842	0.175	0.740
油脂质量分数 oil content	−0.694	0.245	0.542

根据主成分分析结果提取到的2个主成分,综合原始数据标准化矩阵、主成分矩阵与相应特征根,将每个指标标准化后的数据代入,计算各主成分得分,并结合各主成分方差贡献率计算得到综合得分,见表10。F3处理下的4个处理的综合得分较高,均超过0.8,其中F3S2、F3S3、F3S4处理的排名为前三名,而F1处理下的各处理得分较低,除F1S3处理外均为负值。

2.5　不同施肥处理对红松球果与种子经济效益的影响

12个处理间的种子净收益范围为13 255.77~35 693.62元,其中F3S2处理的净收益最高,达35 693.62元,较F1S1处理(未施肥处理)提高18 708.22元。净收益排名前3的处理依次为F3S2、F3S1、F3S3处理。而F3S1处理(高体积分数叶面肥)虽排名第2,但其净收益与F3S1处理接近,并且肥料成本较低。F3处理(高体积分数叶面肥)的经济效益普遍优于低体积分数或无叶面肥处理,且与低土壤施肥量结合时效果最佳,见表11。

表10　各主成分及综合得分汇总

Tab. 10 Summary of principal components and comprehensive scores

叶面施肥 foliar fertilization	土壤施肥 soil fertilization	得分 Score			排序 rank
		第一主成分 PC 1	第一主成分 PC 2	标准得分 Z-score	
F1	S1	−2.780	0.453	−1.890	10
	S2	−1.630	−2.616	−1.901	11
	S3	1.209	−1.219	0.541	6
	S4	−1.763	2.660	−0.546	8
F2	S1	−1.450	−3.663	−2.059	12
	S2	−2.594	0.613	−1.711	9
	S3	−0.507	2.054	0.198	7
	S4	1.335	1.494	1.379	4
F3	S1	1.142	0.252	0.897	5
	S2	1.850	2.006	1.893	1
	S3	2.484	−0.024	1.794	2
	S4	2.705	−2.010	1.407	3

3　讨论

3.1　不同施肥处理对红松种子品质的影响

氮素是组成叶绿素分子的核心元素,施氮可显著提高叶片叶绿素质量分数,而叶绿素质量分数的增加可提升叶片的光合能力[23],光合产物随之增加,为生殖生长提供了更充裕的物质基础。本研究发现,在红松球果速生期对其进行叶面施肥与土壤施肥,随着叶面氨基酸水溶肥体积分数升高,显著促进红松球果质量与单株球果产量,高体积分数叶面施肥与高土壤施肥量结合施用可显著促进种子纵向与横向生长,这说明叶面肥可促进红松结实,适当的土壤施肥量与高体积分数叶面肥和土壤施肥结合均能提高种子的体积大小。杉木(*Cunninghamia lanceolata*)经过叶面施肥处理后,低产无性系球果数量显著增加82个[24]。叶面施锌比土壤施锌更能提高油料作物凤丹白牡丹(*Paeonia suffruticosa*)种子产量,叶片喷锌处理通过提高叶片锌质量分数和次生代谢物合成[25]。云曼红豆杉(*Taxus*

表 11 不同施肥处理的红松种子经济效益分析

Tab. 11 Economic benefit analysis of *Pinus koraiensis* seeds under different fertilization treatments

叶面施肥 foliar fertilization	土壤施肥 soil fertilization	种子产量/(kg·hm^{-2}) seed yield	种子产值/(元·hm^{-2}) seed revenue	施肥总成本/元 fertilization cost	净收益/元 net revenue	排名 rank
F1	S1	381.67	19 083.40	2 098.00	16 985.40	9
	S2	329.81	16 490.50	2 628.00	13 862.50	10
	S3	332.56	16 628.10	2 918.00	13 710.10	11
	S4	453.39	22 669.60	3 226.00	19 443.60	7
F2	S1	453.35	22 667.45	2 623.28	20 044.17	5
	S2	465.39	23 269.45	3 153.28	20 116.17	4
	S3	333.98	16 699.05	3 443.28	13 255.77	12
	S4	472.48	23 624.20	3 751.28	19 872.92	6
F3	S1	656.48	32 824.05	2 648.38	30 175.67	2
	S2	777.44	38 872.00	3 178.38	35 693.62	1
	S3	522.19	26 109.60	3 468.38	22 641.22	3
	S4	435.50	21 775.20	3 776.38	17 998.82	8

madia×*T. yunnanensis*‘Yunman’)通过叶面施用 0.2% 尿素+0.2% KH_2PO_4混合溶液可显著提高结实率、结实量[26]。以上研究表明,合理的叶面施肥可以达到土壤施肥的增产效果,对植株进行叶面施肥后,叶片厚度、叶绿素质量分数和叶面积均显著增加[27],并提升光系统 PSⅡ电子传递效率[28],加快光合产物积累速率从而提升了种实的质量。

而本研究中施用的氨基酸水溶肥和尿素均为速效氮源,在红松球果发育期施用后会被其快速吸收,可为球果发育提供结构物质与能量储备,从而促进球果质量与产量的提升。木本油料植物香榧(*Torreya grandis*)经不同种类的叶面肥处理后验证了这一观点,香榧叶片喷施不同叶面肥后,高力钙水溶肥处理较对照分别提高 10.9% 和 3.3% 的坐果率与出仁率,而氨基酸水溶肥处理后香榧种实的单核质量提高了 9.8%,并显著提升了种实的综合品质[29],种实膨大发育过程中倾向于吸收氨基酸水溶肥。因此,本试验中球果质量和产量及种子的提高,可能由于叶面施肥提高了红松叶片的光合能力,为球果发育提供了更充裕的光合产物。

3.2 不同施肥处理对种仁营养成分的影响

红松种仁可溶性糖、可溶性蛋白与油脂质量分数是影响红松籽品质的重要指标[30]。坚果中蛋白质、油脂质量分数越高,口感就会越细腻。本研究发现,叶面施肥与土壤施肥显著提高种仁的可溶性蛋白质量分数,并随着叶面肥体积分数升高达到最大值。氮素供应水平与种子蛋白质积累的正相关关系已在多种植物中得到证实[30-31],施氮后的无芒雀麦(*Bromus inermis*)成熟籽粒总蛋白质量分数增加 17.3%~60.2%[32],施氮处理后花生(*Arachis hypogaea*)仁中粗蛋白质量分数比不施氮处理时提高 1.24~3.57%[33]。本研究中氨基酸水溶肥和尿素的施用为红松种仁的蛋白质合成提供了氨基酸前体,因此可溶性蛋白质量分数随施肥体积分数升高而持续增加。

叶面施肥与土壤施肥对红松种仁油脂质量分数的影响与可溶性蛋白质量分数影响不同,只施加土壤肥对种仁油脂合成无促进作用,F2S1 处理(低体积分数叶面肥)后油脂质量分数显著积累,F2S2 处理(低体积分数叶面肥与低土壤施肥量)组合也可以促进油脂合成积累,而高氮处理(F3S3、F3S4 处理)对油脂合成无促进作用,甚至可能产生抑制。多数油菜(*Brassica napus*)品种在施氮后种子含油量会降低,施氮可提高单株结果数以获得高籽粒产量,但高氮素投入会降低籽粒含油量 3.3%~12.1%[34]。蛋白质合成先于脂质合成发生,而蛋白质合成过程中会消耗大量光合产物,从而削弱脂质合成[35]。

另外,种仁长与油脂呈现显著负相关,F1S3 处理的种子长和种仁长性状表现较好,但油脂质量分数显著降低,种仁纵向生长与油脂积累过程可能存在代谢权衡[36-37],这种权衡反映了植物在碳氮代谢平衡中的

内在分配策略,充足的氮素优先促进蛋白质合成和种子生长,而光合产物被更多用于形态建成而非油脂合成。在山核桃(*Carya cathayensis*)上发现,降低土壤施肥量配施氨基酸叶面肥,能使蛋白质和脂肪质量分数分别提高16.24%和13.73%[38]。

3.3　基于主成分分析的综合评价与经济效益分析

无人机喷施叶面肥具有作业便利、肥料撒施均匀等优势[39],在作物中利用无人机施用氨基酸水溶肥可有效提升作物的产量与经济效益[40]。本研究采用主成分分析对红松种实指标进行综合评价,最终确定球果鲜质量、出种率、种子千粒质量、种仁可溶性糖、可溶性蛋白、油脂质量分数6个指标作为评价红松种实品质的关键性指标。不同施肥处理组合得分前三分别是F3S2、F3S3、F3S4处理。高体积分数叶面施肥或高体积分数叶面施肥与中低土壤施肥量组合均可显著提升红松球果与种实品质。对不同施肥处理的红松种子经济效益进行分析,发现F3S2处理的种子净收益排名第一,较不施肥处理每公顷提高18 708.22元。而高体积分数叶面施肥,即F3S1处理也有着较高的种子净效益,施肥操作更为简便。虽然F3S3处理的球果与种实品质排在第二,但其经济效益较低。

4　结论

叶面施肥是影响红松球果产量和种仁营养品质的主要因子,与土壤施肥存在协同增效作用。球果干质量、单株球果产量和种子产量均随叶面施肥体积分数升高而显著增加,高体积分数叶面施肥与低体积分数土壤施肥配施(F3S2处理)效果最佳。叶面施肥与土壤施肥均可显著提高可溶性蛋白质量分数,且随施肥水平升高而持续增加。而单独土壤施肥对种仁油脂合成无显著促进作用,低体积分数叶面施肥与低质量分数土壤施肥量结合(F2S2处理)和低体积分数叶面施肥(F2S1处理)时,可显著提高油脂质量分数9.1%~9.6%。综合经济效益与种实品质评价进行分析,F3S2处理表现最优,种子净收益达36 152.3 元/hm^2,主成分分析综合评分排名第一;F3S1处理净收益次之,为30 634.45 元/hm^2,施肥操作更简便、成本更低。

因此,在红松果林施肥管理中,高体积分数(0.2%)叶面施肥与低施肥量(50 kg N·hm^{-2})土壤施肥组合效果最佳,可综合提高红松种子大小、营养成分质量分数及经济效益。如果考虑到施肥便利与成本因素,可采用高体积分数(0.20%)叶面施肥处理。

参　考　文　献

[1] 张含国,张振. 红松种质资源评价与利用研究[M]. 北京:科学出版社,2018.
Zhang Hanguo, Zhang Zhen. Evaluation and utilization of germplasm resources of *Pinus koraiensis*[M]. Beijing: Science Press, 2018.

[2] Yoon T H, Im K J, Koh E T, et al. Fatty-acid compositions of *Pinus koraiensis* seed[J]. Nutrition Research, 1989, 9(3): 357-361.

[3] 王玮槐,陈雨桐,党乾顺,等. 红松无性系和优树种子性状及营养成分分析[J]. 森林工程,2019,35(2):11-20,26.
Wang Weihuai, Chen Yutong, Dang Qianshun, et al. Analysis of characters and nutritional components of *Pinus koraiensis* seeds on clones and superior trees[J]. Forest Engineering, 2019, 35(2): 11-20, 26.

[4] 张振,张磊,张含国,等. 铁力红松种子园无性系种子形态及营养成分变异研究[J]. 植物研究,2014,34(3):356-363.
Zhang Zhen, Zhang Lei, Zhang Hanguo, et al. Variations in nutrition compositions and morphology characteristics of pine-nuts in Korean pine (*Pinus koraiensis*) seed orchard of Tieli[J]. Bulletin of Botanical Research, 2014, 34(3): 356-363.

[5] 王莉莉. 红松仁油甾醇和甾醇酯的制备及降血脂功能的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2022.
Wang Lili. Preparation of phytosterols and sterols esters of Korean pine seed oil and their hypolipidemic function[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.

[6] 殷东生,张建瑛. 红松结实大年和小年枝叶中碳氮磷质量分数的差异[J]. 东北林业大学学报,2024,52(9):53-57.
Yin Dongsheng, Zhang Jianying. The differential carbon, nitrogen, and phosphorus mass fractions in on and off year branches and leaves of *Pinus koraiensis* fruiting[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(9): 53-57.

[7] Wu H B, Zhang J Y, Rodríguez-Calcerrada J, et al. Large investment of stored nitrogen and phosphorus in female cones is consistent with infrequent reproduction events of *Pinus koraiensis*, a high value woody oil crop in Northeast Asia[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 13: 1084043.

[8] 殷东生,张建瑛. 无机氮素形态和质量配比对红松嫁接幼树生长和生理的影响[J]. 东北林业大学学报,2025,53(9):65-69,100.
Yin Dongsheng, Zhang Jianying. The impact of inorganic nitrogen forms and mass ratios on the growth and physiology of *Pinus koraiensis* grafted saplings[J]. Journal of

Northeast Forestry University, 2025, 53(9): 65-69, 100.

[9] Sete P B, Comin J J, Ciotta M N, et al. Nitrogen fertilization affects yield and fruit quality in pear[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 258: 108782.

[10] 吕寻, 胡勐鸿. 日本落叶松种子园结实母株种实性状对氮磷钾配比施肥的响应[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(6): 6-11.
Lyu Xun, Hu Menghong. Response of seed characteristics of seed-bearing mother plant of *Larix kaempferi* seed orchard to nitrogen, phosphorus and potassium proportional fertilization[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2020, 40(6): 6-11.

[11] 皮兵. 氮磷钾配比施肥对白檀开花结实和油脂含量的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
Pi Bing. The effects of NPK proportional fertilization on the flowering, fruiting and fat content of *Symplocos paniculata*[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2017.

[12] 王珂, 尹昀洲, 张明辉, 等. 林龄对红松人工林叶片-凋落物-土壤C、N、P生态化学计量特征的影响[J]. 西部林业科学, 2023, 52(2): 55-61, 74.
Wang Ke, Yin Yunzhou, Zhang Minghui, et al. Effects of stand age on ecological stoichiometric characteristics of C, N and P in leaves, litter and soil of *Pinus koraiensis* plantation[J]. Journal of West China Forestry Science, 2023, 52(2): 55-61, 74.

[13] 徐冰玉, 刘彬昕, 李晔男, 等. 施肥对红松无性系果林生长及结实的影响[J]. 林业科技, 2023, 48(3): 10-13.
Xu Bingyu, Liu Binxin, Li Yenan, et al. Effect of fertilization on the growth and fruiting of *Pinus koraiensis* clonal orchards[J]. Forestry Science and Technology, 2023, 48(3): 10-13.

[14] 谷佳莹, 王海峰, 魏红洋, 等. 施肥对红松果材兼用林营养和结实的影响[J]. 温带林业研究, 2018, 1(2): 15-19, 25.
Gu Jiaying, Wang Haifeng, Wei Hongyang, et al. Effects of fertilization on needle nutrition and cone yield of a dual-purpose *Pinus koraiensis* plantation established for timber and pine nut production[J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2018, 1(2): 15-19, 25.

[15] 姚博. 施肥对不同林龄红松生长及结实的影响[J]. 防护林科技, 2019(5): 26-27.
Yao Bo. Effect of fertilization on growth and fruiting of *Pinus koraiensis* at different stand ages[J]. Protection Forest Science and Technology, 2019(5): 26-27.

[16] 段春慧, 申明, 张治平, 等. 氨基酸肥料对大豆叶片光合作用与产量的影响[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(4): 15-20.
Duan Chunhui, Shen Ming, Zhang Zhiping, et al. Effects of amino acid fertilizer on leaf photosynthesis and yield of soybean[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2012, 35(4): 15-20.

[17] 谢荔, 成学慧, 冯新新, 等. 氨基酸肥料对'夏黑'葡萄叶片光合特性与果实品质的影响[J]. 南京农业大学学报, 2013, 36(2): 31-37.
Xie Li, Cheng Xuehui, Feng Xinxin, et al. Effects of an amino acid fertilizer on the leaf photosynthesis and fruit quality of 'Summer Black' grape[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2013, 36(2): 31-37.

[18] 颜宏, 白亚妮, 冯志珍, 等. 含氨基酸水溶肥料研究现状及其在农业生产中的应用[J]. 中国农学通报, 2024, 40(24): 67-72.
Yan Hong, Bai Yani, Feng Zhizhen, et al. Research status of water-soluble fertilizers containing amino-acids and its application in agricultural production[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(24): 67-72.

[19] 邵光文, 周瑛, 邵建华, 等. 新型氨基酸肥料的研究与肥效试验[J]. 化肥工业, 2015, 42(3): 90-94.
Shao Guangwen, Zhou Ying, Shao Jianhua, et al. Study of new type amino acid fertilizer and fertilizer efficiency experiment[J]. Chemical Fertilizer Industry, 2015, 42(3): 90-94.

[20] 温明霞, 张顺昌, 吴韶辉, 等. 蛋白水解氨基酸肥料对红美人杂柑果实品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(3): 422-428.
Wen Mingxia, Zhang Shunchang, Wu Shaohui, et al. Effect of protein hydrolysate-based amino-acid fertilizers on fruit quality of *Hongmeiren citrus* hybrid[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33(3): 422-428.

[21] 罗娅, 彭雪梅, 王晓莉, 等. 氨基酸水溶肥对枇杷果实品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2026(5): 32-41.
Luo Ya, Peng Xuemei, Wang Xiaoli, et al. Effects of amino acid watersoluble fertilizer on loquat fruit quality[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2026(5): 32-41.

[22] 欧阳建怡. 三种叶面肥对榛子叶片光合作用与果实品质的影响[D]. 晋中: 山西农业大学, 2022.
Ouyang Jianyi. Effects of three foliar fertilizers on leaf photosynthesis and nut quality of hazelnut[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2022.

[23] 李潇, 杨伟财, 曹振宇, 等. 施肥对红松无性系生理和激素的影响[J]. 森林工程, 2023, 39(2): 22-29.
Li Xiao, Yang Weicai, Cao Zhenyu, et al. Effects of fertilization on physiology and hormones of *Pinus Koraiensis* clones[J]. Forest Engineering, 2023, 39(2): 22-29.

[24] Duan Y, Zhao L Y, Ye D Q, et al. The effect of minerals and hormones on the nutrients in Chinese fir leaves and seed set[J]. Plants, 2025, 14(6): 887.

[25] Zheng W W, Zhao G D, Zhang W Q, et al. iTRAQ proteome analysis reveals the underling mechanisms of foliage zinc-spraying to improve photosynthetic capacity and seed yields of *Peaonia ostii* 'Fengdan'[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2024, 215: 109082.

[26] 余雨红. 施肥、覆盖和整枝对云曼红豆杉种子产量与质量的影响[D]. 成都:四川农业大学, 2022.
Yu Yuhong. Effects of fertilization, mulching and pruning on seed yield and quality of *Taxus madia*×*T. yunnanensis* 'Yunman'[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2022.

[27] 刘鑫铭, 陈婷, 刘锡铭, 等. 含氨基酸水溶性肥料对巨峰葡萄的影响[J]. 福建农业学报, 2019, 34(7): 782-789.
Liu Xinming, Chen Ting, Liu Ximing, et al. Effects of spraying water-soluble, amino acids-containing fertilizer on kyoho grape vines[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2019, 34(7): 782-789.

[28] Henderson R C B, Sanderson M J, Fowles A. A review of the foliar application of individual amino acids as biostimulants in plants [J]. Discover Agriculture, 2025, 3(1): 69.

[29] 郝琪淳, 谢吉全, 戴文圣, 等. 香榧种实充实期叶面施肥对种实品质的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(3): 457-466.
Hao Qichun, Xie Jiquan, Dai Wensheng, et al. Effect of foliar fertilization on seed quality of *Torreya grandis* 'Merrillii' during seed filling period[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024, 41(3): 457-466.

[30] Su X Y, Xu S, Cao L Z, et al. Comprehensive evaluation of rice quality in response to nitrogen application [J]. Agronomy Journal, 2025, 117(4): e70128.

[31] Li G H, Guo X, Hou L, et al. Nitrogen application in pod zone improves yield and quality of two peanut cultivars by modulating nitrogen accumulation and metabolism [J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 60.

[32] Ou C M, Zhao S Q, Jia Z C, et al. Integrated multi-omics analysis reveals the role of nitrogen application in seed storage protein metabolism and improvement of inferior grains in smooth bromegrass [J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1605073.

[33] 王建国, 郭峰, 赵继浩, 等. 不同肥料类型与施肥方式对花生籽仁品质的影响[J]. 中国油料作物学报, 2024, 46(3): 565-574.
Wang Jianguo, Guo Feng, Zhao Jihao, et al. Effects of different fertilizer types and fertilization methods on quality of peanut kernels [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2024, 46(3): 565-574.

[34] 胡文诗, 李凯旭, 尹羽丰, 等. 油菜品种中油杂501高产油的氮素需求规律[J]. 中国油料作物学报, 2025, 47(2): 435-442.
Hu Wenshi, Li Kaixu, Yin Yufeng, et al. Nitrogen demand characteristics in *Brassica napus* cultivar Zhongyouza 501 with high oil production [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2025, 47(2): 435-442.

[35] Zhu J R, Dai W J, Chen B Y, et al. Research progress on the effect of nitrogen on rapeseed between seed yield and oil content and its regulation mechanism [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(19): 14504.

[36] Zhang F H, Li Z, Zhou J Q, et al. Comparative study on fruit development and oil synthesis in two cultivars of *Camellia oleifera* [J]. BMC Plant Biology, 2021, 21(1): 348.

[37] 郑师衡, 李伟, 谢瑶, 等. 川东北地区油茶种质资源果实表型和品质性状综合评价[J]. 四川农业大学学报, 2026(4): 323-331.
Zheng Shiheng, Li Wei, Xie Yao, et al. Comprehensive evaluation of fruit phenotypic and quality traits in *Camellia oleifera* germplasm resources from Northeastern Sichuan [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2026(4): 323-331.

[38] 曾成城, 苏天明, 苏利荣, 等. 减量化肥配施叶面肥对山核桃产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(6): 108-114.
Zeng Chengcheng, Su Tianming, Su Lirong, et al. Effects of reducing chemical fertilizer combined with foliar fertilization on the yield and quality of *Carya cathayensis* [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(6): 108-114.

[39] 钟铭隆, 黄培耕, 罗志刚, 等. 智能根部施肥技术与无人机喷施叶面肥相结合的优势[J]. 林业科技通讯, 2024(3): 109-111.
Zhong Minglong, Huang Peigeng, Luo Zhigang, et al. Advantages of the combination of intelligent root fertilization technology and UAV application of foliar fertilizer [J]. Forest Science and Technology, 2024(3): 109-111.

[40] 余红英, 宋雨玲, 张颖, 等. 无人机追施氨基酸水溶肥对南方中稻产量及收益的影响[J]. 湖南农业科学, 2024(7): 56-59.
Yu Hongying, Song Yuling, Zhang Ying, et al. Topdressing amino acid water-soluble fertilizer by unmanned aerial vehicles increases the yield and profit of mid-season rice in Southern China [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2024(7): 56-59.