doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.03.004

不同施肥处理对核桃楸内源激素及生长的影响

万少华[1],张磊[1],李志新[1*],张含国[1],代伟昭[2],石宝英[2],于宏影[3]
(1.林木遗传育种全国重点实验室(东北林业大学),哈尔滨 150040;
2.五常市宝龙店种子林场,黑龙江 五常 150200;3.国家林业和草原局哈尔滨林业机械研究所,哈尔滨 150086)

摘　要:为了解不同施肥处理对核桃楸内源激素和生长的影响,以 6 年生核桃楸无性系为试验材料,进行氮(N)、磷(P)、钾(K)三因素正交施肥试验,测定其内源激素含量及生长性状。分析结果表明,施肥有助于提高核桃楸反式玉米素(Trans-Zeatin, tZ)、赤霉素(Gibberellin A3,GA_3)、脱落酸(Abscisic acid, ABA)和吲哚乙酸(Indole acetic acid, IAA)4 种内源激素的含量,其中 tZ 含量变化最大;N、P 和 K 肥料对内源激素影响程度不同,影响 tZ 和 GA_3 含量的作用为 N>K>P,影响 ABA 和 IAA 含量的作用为 N>P>K;氮肥是提升 4 种内源激素含量最优因素,综合分析提升 4 种内源激素含量的施肥处理组合为氮肥 0.75 kg/株、磷肥 0.3 kg/株、钾肥 0.15 kg/株。生长方面,施肥降低种源内无性系的树高变异,不同施肥处理间树高的净生长量差异不显著,不同施肥处理对新梢长度和粗度促进作用不明显。

关键词:核桃楸; 无性系; 施肥; 内源激素; 生长
中图分类号:S792.132　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-8023(2024)03-0033-14

Effects of Different Fertilization Conditions on Endogenous Hormones and Growth of *Juglans mandshurica* Maxim

WAN Shaohua[1], ZHANG Lei[1], LI Zhixin[1*], ZHANG Hanguo[1], DAI Weizhao[2], SHI Baoying[2], YU Hongying[3]
(1. State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Baolongdian Seed Forestry Farm, Wuchang 150200, China; 3. Harbin Forestry Machinery Research Institute, National Forestry and Grassland Administration, Harbin 150086, China)

Abstract: In order to understand the effects of different fertilization treatments on endogenous hormones and growth of *Juglans mandshurica* Maxim, a three-factor orthogonal fertilization test of N, P and K was conducted to determine the endogenous hormone contents and growth traits of 6-year-old *Juglans mandshurica* Maxim clones as test materials. The results showed that fertilization helped to increase the contents of four endogenous hormones of *Juglans mandshurica* Maxim, namely trans-zeatin (tZ), gibberellin (GA_3), abscisic acid (ABA) and indole acetic acid (IAA), among which the content of trans-zeatin (tZ) changed the most; the three kinds of fertilizers, namely, nitrogen, phosphorus and potassium, had different influences on the endogenous hormones, and the influences on the contents of trans-zeatin (tZ) and gibberellin (GA3) were N>K>P, and the role of affecting abscisic acid (ABA) and indole acetic acid (IAA) content was N>P>K; nitrogen fertilizer was the optimal factor to enhance the content of the four endogenous hormones, and the combination of fertilization treatments to enhance the content of the four endogenous hormones in the comprehensive analysis was 0.75 kg/plant of nitrogen fertilizer, 0.3 kg/plant of phosphorus fertilizer, 0.15 kg/plant of potash fertilizer. In terms of growth, fertilization reduced the variation in tree height within the asexual seed source, but the difference in net growth in tree height between the different fertilization treatments was not significant, and the different fertilization treatments did not have a significant effect on the promotion of new shoot length and coarseness.

Keywords: *Juglans mandshurica* Maxim; clone; fertilization; endogenous hormones; growth

---

收稿日期:2023-11-01
基金项目:黑龙江省应用技术研究与开发计划项目(GA19B201-7)。
第一作者简介:万少华,硕士研究生。研究方向为林木遗传育种。E-mail: wsh1426@163.com
*通信作者:李志新,博士,副教授。研究方向为林木遗传改良。E-mail: lizhixin_11@126.com
引文格式:万少华,张磊,李志新,等.不同施肥处理对核桃楸内源激素及生长的影响[J].森林工程,2024,40(3):33-46.
WAN S H, ZHANG L, LI Z X, et al. Effects of different fertilization conditions on endogenous hormones and growth of *Juglans mandshurica* Maxim[J]. Forest Engineering, 2024,40(3):33-46.

0 引言

核桃楸(*Juglans mandshurica*)是我国东北地区珍贵阔叶树种之一,被列为国家二级重点保护植物[1],主要分布在中国东北地区和华北地区[2]。核桃楸不仅是优良的木本油料、果材兼备的经济树种[3],而且具有抗癌、抑菌、镇痛和抗病毒等作用[4]。核桃楸种群数量小,嫁接成活难度大,品种选育后繁育进程缓慢,严重影响了良种推广和丰产,因此提高种实产量和早期生长技术措施研究十分必要。

良好的营养水平及各元素之间的平衡状况是植物正常生长所必需的[5],氮(N)、磷(P)、钾(K)的积累是植株干物质积累的基础,也是植物生长发育的三大必需元素[6-10]。N是果树体内蛋白质形成的物质基础,蛋白质又能在生长素、细胞分裂素和赤霉素的催化下形成各种酶,参与代谢;P影响细胞分裂素在果树体内形成;K参与了植物生长促进剂的形成过程,还在生长素和细胞分裂素共同催化下促进了碳水化合物的运转、代谢[11]。N、P、K与内源激素联系密切,可以通过调节内源激素的含量变化间接影响果实内在品质[12]。反式玉米素(tZ)是细胞分裂素一种,可以促使种子萌发、开花和果实发育[11]。生长素吲哚乙酸(Indole acetic acid,IAA)可以促进细胞分裂和伸长,提高植物抗逆性,增加叶片生物量,加速果实发育[14]。赤霉素类(GA_3)是高效生长促进剂,可以促进细胞伸长,加速生长发育提早成熟,提高产量[13]。脱落酸(Abscisic acid,ABA)可以促进果实发育成熟,促进种实的贮藏蛋白和糖分的积累[15]。新梢生长量是反映长势强弱的重要指标之一[16],对于幼年树,通过施肥增加新梢长度和粗度以及树高,可以增加结实面积,从而提高结实量。核桃楸在6月初进入坐果期,6月中旬到8月末都属果实发育时期[17]。有研究发现,核桃楸叶片IAA、GA_3、ABA等内源激素含量在7月之前缓慢上升,7月初达到峰值,叶片内源激素含量与果实发育有密切关系[18],说明果实发育时期IAA、GA_3、ABA高含量有利于果实生长。玉米素(trans-Zeatin-riboside, ZR)、IAA和GA显著促进果叶生长,输出养分有利于种实发育,有利于形成大年[19]。及利等[20]研究发现,指数施肥方式有利于当年生核桃楸幼苗,100 mg/株施肥量最优。刘斗南等[21]研究表明,一年生苗木最佳氮磷钾施入量为:施氮27.6 g/m^2、施磷7.2 g/m^2、施钾18 g/m^2。

目前关于核桃楸施肥的研究多集中于幼苗且研究施肥后的光合特性和生长性状偏多,施肥对核桃楸内源激素影响的相关研究较少。本研究以6年生核桃楸无性系为材料,采用N、P、K三因素的正交设计,测定内源激素tZ、GA_3、ABA、IAA的含量,调查生长量、新梢长度和粗度,分析施肥对核桃楸无性系内源激素和生长的影响,提出合理的施肥方案,为内源激素促进结实研究提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

宝龙店种子林场位于127°38′~127°55′E,44°50′~44°58′N。山脉属于长白山系,张广才岭西坡,低山丘陵地带。气候属寒温带大陆性季风气候,年降水量620.9 mm,最低气温-40.9 ℃,最高气温35.6 ℃,年均气温3.4 ℃,年无霜期120 d左右。土壤类型为暗棕壤。试验地地形为平坡,坡度为5°,东南坡向,立地条件均一。

1.2 试验设计和方法

材料以宝龙店林场2017年定植的核桃楸无性系为试验材料,无性系接穗来源于5个地点(种源),分别是黑龙江省的五常(WC)、金山屯(JST)、东京城(DJC)、虎林县(HL)和吉林省三岔子(SC),株行距3 m×4 m。为减小材料之间的差异对总体试验结果造成影响,将试验林全部种源进行设计,每组材料种源配置,数量均保持一致,从试验林中选取240株进行施肥试验,包含16种处理,每种处理共15株,包含5个种源,每个种源包含3个无性系,每个无性系1株。

供试肥料为氮肥选用尿素(含氮量46%),磷肥选用磷酸一铵(含P_2O_5 61%),钾肥选用氯化钾(含K_2O 62%)。

试验设计。试验选用$L_{16}4^3$正交表进行3因素4水平正交设计,见表1。3因素分别为氮肥、磷肥和钾肥,水平为施肥剂量,氮肥的4水平分别是0、0.25、0.50、0.75 kg,磷肥和钾肥是4水平分别是0、0.15、0.30、0.45 kg,共16种处理组合,其中处理1为对照组。施肥方式为环状施肥,施肥时间为2022年6月初。

植物激素含量测定。于施肥后1个月(2022年7月初),采集每株南向健康的叶片3片,液氮速冻

后,通过干冰保存运输并进行内源激素含量的测定。为尽可能减小材料和其他因素对试验造成的误差,每种处理的 15 个单株各取 0.5 g 叶片,进行液氮研磨后混样测量,设置 3 次技术重复。内源激素 tZ、GA_3、ABA 和 IAA 含量采用高效液相色谱法测定(苏州梦犀生物医药科技有限公司测定)。

生长量调查。2021 年 10 月下旬和 2022 年 10 月下旬用塔尺测量树高;每株取南向第一主枝上 3 个 1 年生枝条,用游标卡尺测量新梢粗度,用米尺测量新梢长度。

数据分析。数据的整理分析使用 Excel、SPSS25.0 软件,绘图使用 Oirgin2022 软件,分析方法包括方差分析、Duncan 多重比较和 Pearson 相关性分析。

2　结果与分析

2.1　施肥对核桃楸内源激素的影响

2.1.1　不同施肥处理对核桃楸内源激素含量的影响

核桃楸施肥后,tZ、GA_3、IAA 和 ABA 4 种内源激素含量均有变化,且这 4 种内源激素含量在 16 种处理间均存在显著差异,见表 2。对 4 种内源激素含量进行多重比较,见表 3。由表 3 可知,对照组的 tZ

表 1　核桃楸施肥试验正交设计表格

Tab. 1 Table of orthogonal design of *Juglans mandshurica* Maxim fertilization trial　　kg·株$^{-1}$

处理 Treatment	氮肥(N) Nitrogen fertilizer	磷肥(P) Phosphorus fertilizer	钾肥(K) Potash fertilizer
1	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.15	0.15
3	0.00	0.30	0.30
4	0.00	0.45	0.45
5	0.25	0.00	0.15
6	0.25	0.15	0.00
7	0.25	0.30	0.45
8	0.25	0.45	0.30
9	0.50	0.00	0.30
10	0.50	0.15	0.45
11	0.50	0.30	0.00
12	0.50	0.45	0.15
13	0.75	0.00	0.45
14	0.75	0.15	0.30
15	0.75	0.30	0.15
16	0.75	0.45	0.00

表 2　16 种施肥处理内源激素含量方差分析表

Tab. 2 Analysis of variance (ANOVA) of endogenous hormone content for 16 fertilization treatments

因变量 Implicit variable	变异来源 Variation source	平方和 Square sum	自由度(df) Degree of freedom	均方 Mean square	*F*	显著性 Significance
tZ 含量 tZ content	处理	2.417	15	0.161	72.154	**
	重复	0.071	32	0.002	—	—
	总计	2.489	47	—	—	—
GA_3 含量 GA3 content	处理	43.207	15	2.880	1 498.872	**
	重复	0.061	32	0.002	—	—
	总计	43.268	47	—	—	—
IAA 含量 IAA content	处理	6 796.990	15	453.133	151.735	**
	重复	95.563	32	2.986	—	—
	总计	6 892.553	47	—	—	—
ABA 含量 ABA content	处理	24 891.270	15	1 659.418	3 202.822	**
	重复	16.580	32	0.518	—	—
	总计	24 907.850	47	—	—	—

注:** 为极显著水平($P<0.01$)。

Note: ** means extremely significant level ($P < 0.01$).

表3 16种施肥处理内源激素含量多重比较

Tab. 3 Multiple comparisons of endogenous hormone contents for 16 fertilization treatments

处理 Treatment	tZ/(μg·g^{-1})	GA_3/(μg·g^{-1})	IAA/(ng·g^{-1})	ABA/(μg·g^{-1})
1	0.16±0.02 i	0.60±0.03i	60.26±0.30 i	49.38±0.38 k
2	0.29±0.03 h	1.44±0.01 e	53.38±0.43 j	50.89±0.19 j
3	0.35±0.03 h	1.14±0.05 hg	53.39±0.87 j	44.61±0.21i
4	0.56±0.01 efg	0.86±0.02 j	59.76±0.95 i	89.95±0.25 e
5	0.84±0.06 c	0.43±0.02 m	62.48±0.98 hi	41.43±0.03 m
6	0.80±0.03 cd	0.39±0.03 m	66.00±0.74 gf	69.91±1.51 g
7	0.93±0.04 b	1.22±0.12 gf	89.72±0.85 b	99.42±0.92 d
8	0.64±0.07 e	1.00±0.06 i	66.82±1.18 gf	69.63±0.43 g
9	0.57±0.04 efg	1.14±0.00 h	73.87±0.95 d	61.01±0.11 h
10	0.50±0.03 g	0.59±0.03 l	70.00±0.23 e	54.72±0.92 i
11	0.52±0.03 fg	0.70±0.02 k	67.45±1.07 ef	77.01±0.81 f
12	0.76±0.07 cd	2.11±0.01 d	87.46±1.41 b	69.17±0.27 g
13	0.64±0.04 e	3.84±0.04 a	77.81±2.36 c	60.37±0.27 h
14	0.75±0.03 d	1.28±0.02 f	63.85±1.19 hg	103.40±1.24 c
15	1.02±0.07 a	2.96±0.06 b	93.92±5.22 a	105.00±1.20 b
16	0.59±0.08 ef	2.46±0.02 c	76.74±1.99 cd	115.30±0.23 a
R	3.71	3.52	3.30	3.16

注:表中数据为含量均值±标准差,不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Data in the table are content means ± standard deviation, and different lowercase letters indicate significant differences($P<0.05$).

含量为-0.16 μg/g,15组处理的含量均高于对照组,其中处理15的tZ含量最高,达到了1.02 μg/g,是对照组的6.38倍;对照组的GA_3含量为0.60 μg/g,处理5、处理6、处理10的含量低于对照,含量最低的是处理6,只有0.39 μg/g,其余处理均高于对照,处理13的GA_3含量最高,为3.84 μg/g,是对照组的6.4倍;对照组的IAA含量为60.26 ng/g,处理2、处理3、处理4的含量低于对照,含量最低的是处理2,只有53.38 ng/g,其余处理均高于对照,处理15的含量最高,达到了93.92 ng/g,比对照组高55.9%;对照组的ABA含量为49.38 μg/g,处理3和处理5的ABA含量低于对照,最低的是处理5,为41.43 μg/g,其余处理均高于对照,处理16的含量最高,达到了115.30 μg/g,是对照组的2.3倍。数据标准化处理后分析结果表明,tZ的极差最大,为3.71,说明在4种内源激素中不同施肥处理对tZ含量影响最大。综合分析可知施肥有助于提高内源激素的含量,由于不同施肥处理肥料配比不同,效果略有不同。

2.1.2 不同内源激素施肥方案的选择

为确定3种肥料对叶片tZ含量影响的重要性,进行极差分析,见表4,结果显示氮肥的极差最大,为0.47,其次为钾肥0.21,极差最小的为磷肥,是0.15。说明氮肥的重要性优于钾肥和磷肥,钾肥优于磷肥。以氮肥、磷肥、钾肥4种不同水平为横坐标,tZ含量均值为纵坐标,绘制折线图,如图1(a)所示。由图1(a)可知,随着氮肥和钾肥施用剂量的增加tZ含量呈上升—下降—上升的趋势,随磷肥的剂量增加,呈先上升后下降的趋势。折线图的最高点对应的水平即为提高tZ含量的最佳水平,提高tZ含量的最佳组合是氮肥的2水平(0.25 kg)、磷肥的3水平(0.30 kg),钾肥的2水平(0.15 kg)。进一步分析变异来源,进行多因素方差分析,见表5。方差分析结果显示氮肥、磷肥和钾肥的施用均会对tZ含量产生极显著的差异。多重比较结果见表6,显示当氮肥施用水平为2水平时,tZ含量最大,是0.81 μg/g,比对照组高138.2%;磷肥施用水平为3水平时,tZ含量最大,是0.70 μg/g,比对照组高27.2%;钾肥施用水平为2水平时tZ含量最大,是0.73 μg/g,比对照组高40.3%。多重比较结果与极差分析一致。因此提高tZ含量最佳施肥方案为氮肥(0.25 kg/株)、磷肥(0.3 kg/株)、钾肥(0.15 kg/株)。

表 4　不同施肥处理核桃楸 tZ、IAA、GA_3、ABA 含量极差分析表

Tab. 4 Polar analysis of tZ, IAA, GA3 and ABA contents in *Juglans mandshurica* Maxim with different fertilization treatments

肥料 Fertilizer	均值与极差 Mean and range	tZ/(μg·g^{-1})	IAA/(ng·g^{-1})	GA_3/(μg·g^{-1})	ABA/(μg·g^{-1})
氮肥 Nitrogen fertilizer	K_1	0.34	56.70	1.01	58.70
	K_2	0.81	71.26	0.76	70.13
	K_3	0.59	74.70	1.14	65.47
	K_4	0.75	78.08	2.64	96.12
	R	0.47	21.38	1.88	37.42
磷肥 Phosphorus fertilizer	K_1	0.55	68.61	1.50	53.04
	K_2	0.59	63.31	0.92	69.66
	K_3	0.70	76.12	1.51	81.62
	K_4	0.64	72.69	1.61	86.10
	R	0.15	12.81	0.68	33.05
钾肥 Potash fertilizer	K_1	0.52	67.61	1.04	77.99
	K_2	0.73	74.31	1.73	66.70
	K_3	0.58	64.48	1.14	69.63
	K_4	0.66	74.32	1.63	76.10
	R	0.21	9.84	0.69	11.29

对 IAA 含量进行极差分析(表 4),结果显示氮肥的极差最大 21.38,其次是磷肥 12.81,最小的是钾肥 9.84,极差排序由大到小为氮肥、磷肥、钾肥,说明三者的重要性由大到小为氮肥、磷肥、钾肥。为能直观看到叶片 IAA 含量随肥料剂量变化趋势,以 3 种肥料的 4 种水平为横坐标,叶片 IAA 含量均值为纵坐标绘制折线图,如图 1(b)所示。图 1(b)显示随着氮肥剂量的增加,IAA 含量呈上升趋势,随磷肥剂量的增加 IAA 含量呈下降—上升—下降的趋势,随钾肥剂量增加呈上升—下降—上升的趋势。折线图最高点对应的水平即为提高 IAA 含量最佳水平,提高叶片 IAA 含量的最佳处理为氮肥的 4 水平(075 kg)、磷肥的 3 水平(0.30 kg)、钾肥的 2 水平(0.15 kg)。为进一步分析变异来源进行多因素方差分析(表 5),方差分析结果显示氮肥磷肥和钾肥的施用均会对 IAA 含量产生极显著差异。多重比较(表 6)显示当氮肥 4 水平时 IAA 含量是 78.0 ng/g,是 4 个水平中最大值,比对照组高 37.6%;磷肥 3 水平时 IAA 含量 76.1 ng/g,是磷肥 4 个水平中的最大值,比对照组高 10.9%;钾肥 2 水平和 4 水平时 IAA 含量均为 74.3 ng/g,是钾肥 4 个水平中的最大值,比对照组高 9.91%。多重比较结果与极差分析结果一致。因此提高 IAA 含量的最佳施肥方案是氮肥 0.75 kg/株、磷肥 0.3 kg/株、钾肥 0.15 kg/株。

为确定氮肥磷肥钾肥对叶片 GA_3 含量重要性,进行极差分析(表 4)。结果显示氮肥的极差最大,是 1.88,其次是钾肥 0.69,磷肥的极差最小,是 0.68。说明三者的重要性由大到小为氮肥、钾肥、磷肥。以 3 种肥料的 4 种水平为横坐标,叶片 GA_3 含量均值为纵坐标绘制折线图,如图 1(c)所示,图 1(c)显示随着氮肥和磷肥剂量的增加,GA_3 含量呈先下降后上升的趋势,随着钾肥剂量的增加,GA_3 含量呈上升—下降—上升的趋势。折线最高点对应的水平即为提高 GA_3 含量的最佳水平,提高叶片 GA_3 含量的最佳处理组合是氮肥的 4 水平(0.75 kg),磷肥的 4 水平(0.45 kg),钾肥的 2 水平(0.15 kg)。为进一步分析变异来源进行多因素方差分析(表 5),结果显示,氮肥磷肥钾肥的施用均会对 GA_3 含量产生极显著差异。多重比较(表 6),结果表明当氮肥 4 水平时 GA_3 含量最高,为 2.64 μg/g,比对照组高 161.3%;磷肥 4 水平时 GA_3 含量最高,为 1.61 μg/g,

比对照组高7.3%;钾肥2水平时GA_3含量最高,为1.73 μg/g,比对照组高66.3%。多重比较结果与极差分析结果一致。因此提高GA_3含量最佳施肥方案是氮肥0.75 kg/株、磷肥0.45 kg/株、钾肥0.15 kg/株。

对ABA含量进行极差分析(表4),结果显示氮肥极差最大,是37.42,其次是磷肥33.05,极差最小的是钾肥是11.29。说明3种肥料对ABA含量影响的重要性由大到小为氮肥、磷肥、钾肥。以3种肥料的4种水平为横坐标,ABA含量的均值为纵坐标绘制折线图,如图1(d)所示,由图1(d)可知,随着氮肥的剂量增加,ABA含量呈上升—下降—上升趋势,随着磷肥的剂量增加ABA含量呈上升趋势,随着钾肥的剂量增加呈先下降后上升的趋势。折线图最高点对应水平即为提高ABA含量的最佳水平,最佳处理组合是氮肥的4水平(0.75 kg),磷肥的4水平(0.45 kg),钾肥的1水平(0 kg)。为确定变异来源进行多因素方差分析(表5),方差分析结果显示氮肥和磷肥的施用会对叶片ABA含量产生极显著的差异,钾肥的施用则不会对ABA含量产生显著差异。多重比较(表6),结果显示氮肥4水平时ABA含量最高,为96.1 μg/g,比对照组高63.7%,磷肥4水平时ABA含量最高,为86.1 μg/g,比对照组高62.3%。多重比较结果与极差分析结果基本一致。因此提高ABA含量最佳施肥方案是氮肥0.75 kg/株、磷肥0.45 kg/株、钾肥0 kg/株。

结合极差分析和多重比较,可以同时提升4种内源激素含量的施肥处理组合为:氮肥0.75 kg/株,磷肥0.3 kg/株,钾肥0.15 kg/株。

表5 氮肥磷肥钾肥不同剂量水平方差分析表

Tab. 5 ANOVA table for different dose levels of nitrogen fertilizer, phosphate fertilizer and potash fertilizer

变异来源 Variation source	因变量 Implicit variable	平方和 Square sum	自由度 df	均方 Mean square	*F*	显著性 Significance
氮肥 Nitrogen fertilizer	tZ	1.581	3	0.527	44.675	0.000**
磷肥 Phosphorus fertilizer	tZ	0.158	3	0.053	4.476	0.009**
钾肥 Potash fertilizer	tZ	0.300	3	0.100	8.485	0.000**
氮肥 Nitrogen fertilizer	IAA	3 189.411	3	1 063.137	23.374	0.000**
磷肥 Phosphorus fertilizer	IAA	1 095.746	3	365.249	8.030	0.000**
钾肥 Potash fertilizer	IAA	879.243	3	293.081	6.444	0.001**
氮肥 Nitrogen fertilizer	GA_3	25.878	3	8.626	34.265	0.000**
磷肥 Phosphorus fertilizer	GA_3	3.479	3	1.160	4.607	0.008**
钾肥 Potash fertilizer	GA_3	4.346	3	1.449	5.754	0.002**
氮肥 Nitrogen fertilizer	ABA	9 642.628	3	3 214.209	19.118	0.000**
磷肥 Phosphorus fertilizer	ABA	7 856.734	3	2 618.911	15.577	0.000**
钾肥 Potash fertilizer	ABA	1 019.642	3	339.881	2.022	0.127

注:** 为极显著水平($P<0.01$)。

Note: ** means extremely significant level ($P < 0.01$).

表 6　氮肥磷肥钾肥不同剂量水平多重比较表

Tab. 6 Table of multiple comparison of different dose levels of nitrogen fertilizer, phosphorus fertilizer and potash fertilizer

肥料 Fertilizer	剂量/kg Dose	tZ/(μg·g^{-1})	IAA/(ng·g^{-1})	GA$_3$/(μg·g^{-1})	ABA/(μg·g^{-1})
氮肥 Nitrogen fertilizer	0.00	0.34±0.15c	56.70±3.52c	1.01±0.33b	58.70±19.00c
	0.25	0.81±0.12a	71.20±11.29b	0.76±0.38b	70.10±21.43b
	0.50	0.59±0.11b	74.70±8.10ab	1.14±0.63b	65.40±8.79bc
	0.75	0.75±0.18a	78.00±11.45a	2.64+0.97a	96.10±22.15a
磷肥 Phosphorus fertilizer	0.00	0.55±0.26b	68.60±7.83c	1.50+1.44a	53.04±8.50c
	0.15	0.59±0.22b	63.30±6.45c	0.92+0.46b	69.66±21.56b
	0.30	0.70±0.29a	76.10±17.43a	1.51±0.90a	81.62±24.89a
	0.45	0.64±0.10ab	72.60±10.97ab	1.61±0.72a	86.10±19.83a
钾肥 Potash fertilizer	0.00	0.52±0.25c	67.60±6.26b	1.04±0.87b	—
	0.15	0.73±0.29a	74.30±17.76a	1.73±0.97a	—
	0.30	0.58±0.16bc	64.40±7.75b	1.14±0.11b	—
	0.45	0.66±0.17ab	74.30±11.50a	1.63±1.36a	—

注:表中数据为含量均值±标准差,不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

Note: Data in the table are content means ± standard deviation, and different lowercase letters indicate significant differences(P<0.05).

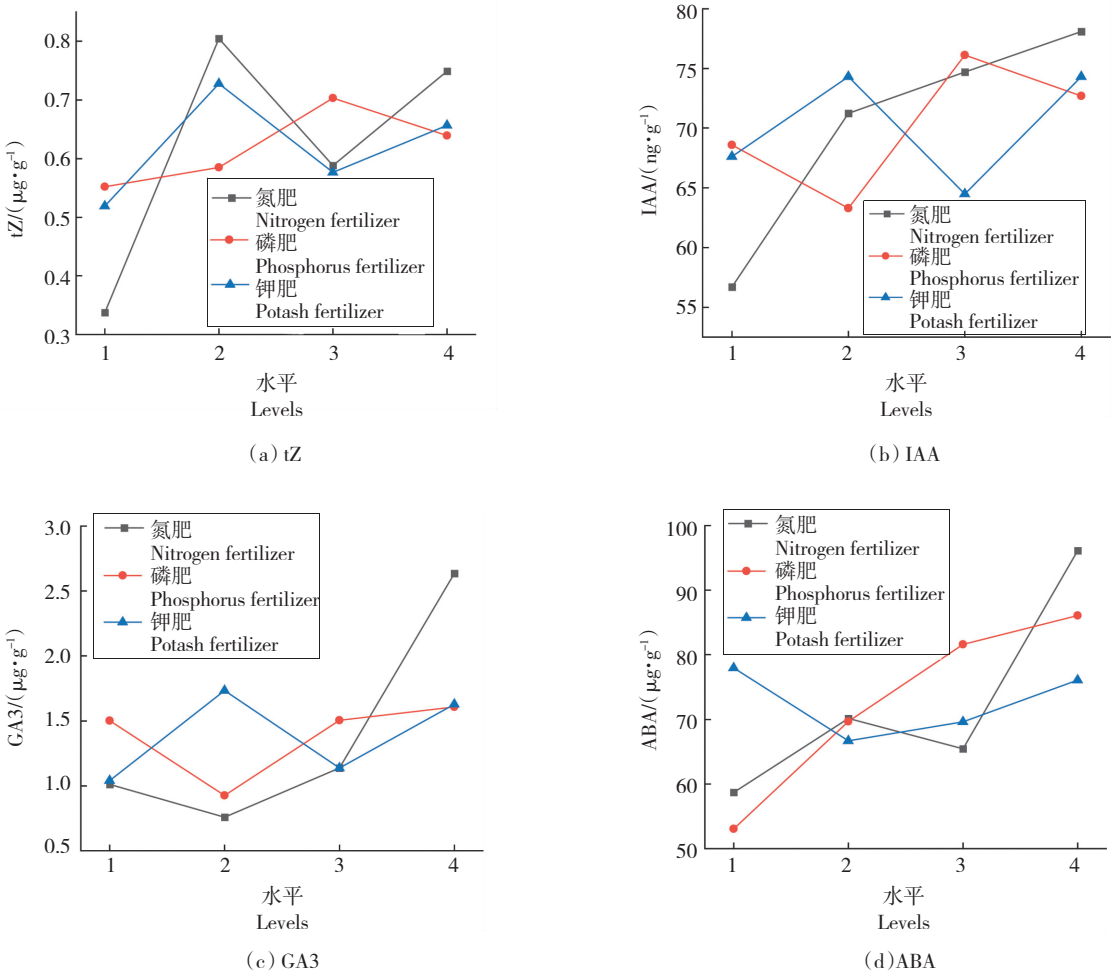


图 1　3 种肥料不同水平内源激素的变化

Fig. 1 Changes in endogenous hormones at different levels of three fertilizers

2.2 施肥对核桃楸生长的影响

2.2.1 施肥对核桃楸种源高生长的影响

为了解试验材料之间的差异性,每个种源选取5个以上无性系,每个无性系3株以上进行2021年树高变异分析,见表7。结果显示不同种源存在着不同程度的变异,变异最大的东京城(DJC),变异系数为32.49%,变异最小的是金山屯(JST),变异系数为20.94%。进行方差分析,见表8,结果显示种源间存在着显著差异。由多重比较的结果(表7)可知,虎林(HL)2021年树高最大,均值为263.89 cm,其次是三岔子(SC),均值为246.42 cm,最小的是金山屯(JST),均值为206.58 cm。说明材料之间存在着一定程度的差异。

表7 2021年与2022年树高变异分析及多重比较表

Tab.7 Analysis of variance and multiple comparisons of tree height between 2021 and 2022

种源 Seed source	2021			2022		
	树高/cm Tree height	变幅/cm Variation	变异系数(%) Coefficient of variation	树高/cm Tree height	变幅/cm Variation	变异系数(%) Coefficient of variation
SC	246.42±60.77 a	129~360	24.66	325.77±54.78 a	21~430	16.82
JST	206.58±43.25 b	110~275	20.94	274.23±50.93 b	190~410	18.57
HL	263.89±72.16 a	155~380	27.35	317.22±77.82 a	180~450	24.53
DJC	235.23±76.43 ab	100~379	32.49	285.36±89.94 ab	140~420	31.52
WC	241.21±56.58 ab	137~340	23.46	299.29±60.73 ab	200~420	20.29

注:表中数据为含量均值±标准差,不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Data in the table are content means ± standard deviation, and different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$).

为明确施肥前后种源的变化规律,对施肥处理单株2022年树高进行变异分析。结果显示,变异最大的是DJC,变异系数为31.52%,变异最小的是JST,变异系数为18.57%。方差分析(表8)结果显示种源间存在着显著差异。进行多重比较(表7)可知,2022年树高SC均值最大,为325.77 cm,其次是HL,均值为317.22 cm,最小的JST,为274.23 cm。结合表7与表9可以看出,变异大小顺序2022年与2021年一致,5个种源2022年树高变异系数均小于2021年树高的变异系数,说明施肥减小了种源内的变异。

表8 2021年和2022年树高种源方差分析表

Tab.8 Analysis of variance (ANOVA) for tree height seed source in 2021 and 2022

年份 Certain year	平方和 Square sum	自由度 df	均方 Mean square	*F*	显著性 Significance
2021	39 951.54	4	9 987.886	2.630	0.038*
2022	44 588.32	4	11 147.080	2.502	0.046*

注:*为显著水平($P<0.05$)。

Note: * means significant level($P<0.05$).

为进一步了解施肥对2022年净生长量(2022年树高减去2021年树高)的影响,进行方差分析(表9),结果显示不同种源间差异达到显著水平,多重比较结果,如图2所示,由图2可知,SC净生长量最大,为79.35 cm,DJC净生长量最小,为50.13 cm。说明施肥之后,SC种源对施肥响应最大,其余种源响应较小。对生长量相对值(净生长量除以2021年树高)进行方差分析(表9),SC相对值最高,其次是JST,最小的是HL,这与净生长量的结果基本保持一致。

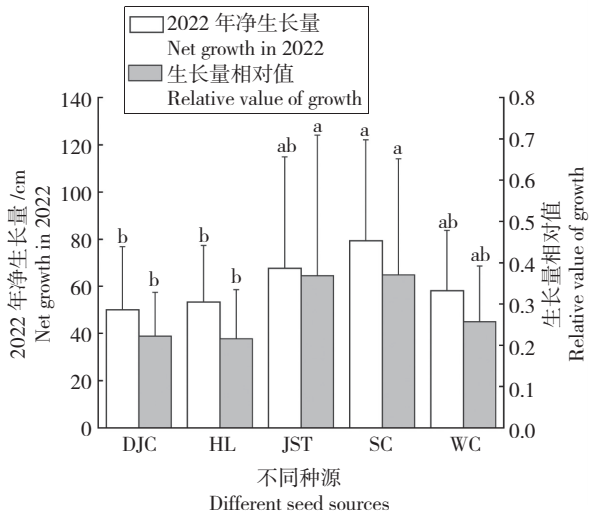
表 9　核桃楸 2022 年净生长量、生长量相对值方差分析表

Tab. 9 Analysis of variance (ANOVA) for net growth and of *Juglans mandshurica* Maxim in 2022

变异来源 Variation source	因变量 Implicit variable	平方和 Square sum	自由度 df	均方 Mean square	*F*	显著性 Significance
种源 Seed source	2022 年净生长量	13 492. 77	4	3 373. 194	2. 690	0. 035 *
种源 Seed source	生长量相对值	0. 56	4	0. 140	2. 755	0. 031 *

注:* 为显著水平(P<0. 05)。

Note: * means significant level(P < 0. 05).



不同小写字母表示差异显著(P<0. 05)

Different lowercase letters indicate significant differences (P<0. 05)

图 2　不同种源 2022 年净生长量、生长量相对值多重比较

Fig. 2 Multiple comparisons of net growth and relative value of growth of different seed sources in 2022

2. 2. 2　不同施肥处理对核桃楸生长的影响

对 16 种施肥处理的 2022 年净生长量、生长量相对值、新梢长度和新梢粗度进行方差分析,见表 10,该方差分析便于比较不同施肥处理对核桃楸生长的影响。结果显示,净生长量和生长量相对值在不同施肥处理间差异不显著,不同施肥处理新梢长度差异不显著,新梢粗度差异达到显著水平。不同施肥处理新梢粗度多重比较结果如图 3 所示,由图 3 可知,10 号施肥处理新梢粗度最大,为 13. 3 mm,比对照组 1 号处理高 10. 7%。2 号施肥处理新梢粗度最小,为 10. 6 mm,比对照组 1 号处理低 11. 7%。对肥料种类和剂量进一步分析,极差分析结果见表 11,2022 年净生长量极差由大到小顺序为钾肥、氮肥、磷肥,生长量相对值极差由大到小顺序为氮肥、钾肥、磷肥,新梢长度极差由大到小顺序为钾肥、磷肥、氮肥,新梢粗度极差由大到小顺序为钾肥、氮肥、磷肥,说明钾肥对净生长量、新梢长度新梢粗度影响较其他 2 种肥料影响大,氮肥对生长量相对值

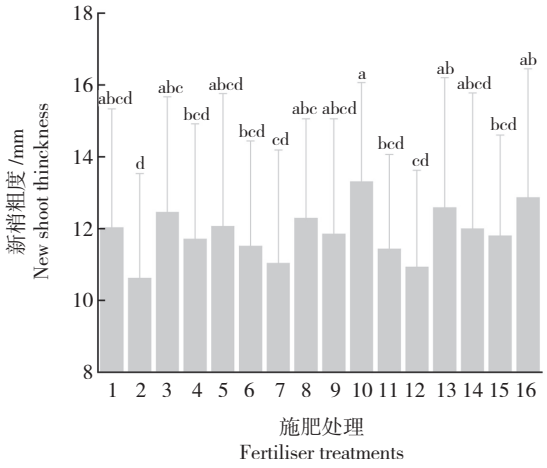
表 10　不同施肥处理 2022 年净生长量、生长量相对值、新梢长度和新梢粗度方差分析表

Tab. 10 ANOVA table for net growth, relative growth, new shoot length, and new shoot thickness in 2022 for different fertilization treatments

因变量 Implicit variable	平方和 Square sum	自由度 df	均方 Mean square	*F*	显著性 Significance
2022 年净生长量 Net growth in 2002	16 392. 640	15	1 092. 842	1. 132	0. 330
生长量相对值 Relative value of grouth	0. 521	15	0. 035	1. 029	0. 427
新梢长度 Length of new tip	15 430. 490	15	1 028. 699	1. 541	0. 085
新梢粗度 New tip roughness	339. 505	15	22. 634	2. 261	0. 004 **

注:** 为极显著水平(P<0. 01)。

Note: ** means extremely significant level(P < 0. 01).



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$)

图3 不同施肥处理新梢粗度的变化

Fig. 3 Changes in new shoot roughness in different fertilizer treatments

影响较其他2种肥料大。之后对3种肥料不同水平进行了多因素方差分析,见表12,方差分析结果表明,氮肥、磷肥、钾肥在4种剂量下对2022年净生长量、生长量相对值、新梢长度和新梢粗度产生的差异并不显著,说明6月份施肥对核桃楸生长促进作用不明显。

2.2.3 不同施肥处理核桃楸不同性状相关性分析

为探究施肥处理后各指标相关性,对各指标进行Pearson相关性分析,见表13。结果显示tZ与IAA呈极显著正相关,tZ与ABA含量相关性显著,为正相关,tZ与GA_3相关性不显著,叶片tZ含量与树高净生长量极显著负相关;GA_3含量与IAA含量相关性显著,且为正相关;IAA含量与ABA含量显著正相关,IAA含量与树高净生长量呈显著负相关;新梢长度和新梢粗度相关性极显著,且为正相关。4种内源激素关系密切,其中IAA与tZ之间相关性最高,其次是IAA和GA_3、ABA和IAA、ABA和tZ、ABA和GA_3相关性最低。

表11 不同施肥处理2022年净生长量、生长量相对值、新梢长度和新梢粗度极差分析表

Tab. 11 Polar analysis of net growth, relative growth, new shoot length and new shoot thickness in 2022 for different fertilization treatments

肥料 Fertilizer	均值与极差 Mean and range	2022年净生长量/cm Net growth in 2022	生长量相对值 Relative value of growth	新梢长度/cm Length of new tip	新梢粗度/mm New tip roughness
氮肥 Nitrogen fertilizer	K_1	21.00	0.11	54.84	11.70
	K_2	19.66	0.10	54.75	11.72
	K_3	18.23	0.10	57.14	11.87
	K_4	18.42	0.02	57.29	12.31
	R	2.77	0.09	2.54	0.61
磷肥 Phosphorus fertilizer	K_1	19.70	0.09	55.58	12.13
	K_2	18.95	0.09	56.49	11.85
	K_3	18.82	0.08	57.66	11.68
	K_4	19.84	0.09	54.30	11.94
	R	1.02	0.01	3.36	0.45
钾肥 Potash fertilizer	K_1	21.38	0.10	56.41	11.95
	K_2	18.48	0.09	52.75	11.35
	K_3	19.64	0.09	54.97	12.14
	K_4	17.80	0.07	59.89	12.16
	R	3.58	0.02	7.14	0.81

表 12　氮肥磷肥钾肥不同剂量水平方差分析表

Tab. 12 ANOVA table for different dose levels of nitrogen fertilizer, phosphate fertilizer and potash fertilizer

变异来源 Variation source	因变量 Implicit variable	自由度 df	均方 Mean square	*F*	显著性 Significance
氮肥 Nitrogen fertilizer	2022 年净生长量	3	748.585	0.768	0.513
磷肥 Phosphorus fertilizer	2022 年净生长量	3	104.234	0.107	0.956
钾肥 Potash fertilizer	2022 年净生长量	3	1 010.872	1.036	0.378
氮肥 Nitrogen fertilizer	生长量相对值	3	0.038	1.105	0.348
磷肥 Phosphorus fertilizer	生长量相对值	3	0.004	0.128	0.943
钾肥 Potash fertilizer	生长量相对值	3	0.038	1.122	0.341
氮肥 Nitrogen fertilizer	新梢长度	3	354.238	0.526	0.665
磷肥 Phosphorus fertilizer	新梢长度	3	359.343	0.533	0.66
钾肥 Potash fertilizer	新梢长度	3	1 580.44	2.345	0.072
氮肥 Nitrogen fertilizer	新梢粗度	3	13.657	1.337	0.261
磷肥 Phosphorus fertilizer	新梢粗度	3	6.569	0.643	0.587
钾肥 Potash fertilizer	新梢粗度	3	26.103	2.556	0.054

表 13　不同施肥处理叶片内源激素新梢长度、粗度、树高净生长量相关性分析

Tab. 13 Correlation analysis of leaf endogenous hormone new shoot length, thickness and net tree height growth of different fertilization treatments

指标 Indicators	tZ 含量 tZ content	GA_3 含量 GA_3 content	IAA 含量 IAA content	ABA 含量 ABA content	新梢长度 Length of new tip	新梢粗度 New tip roughness	树高净生长量 Net tree height growth
tZ 含量 tZ content	1	—	—	—	—	—	—
GA_3 含量 GA_3 content	0.261	1	—	—	—	—	—
IAA 含量 IAA content	0.704**	0.573*	1	—	—	—	—
ABA 含量 ABA content	0.523*	0.346	0.538*	1	—	—	—
新梢长度 Length of new tip	−0.088	−0.163	0.185	−0.003	1	—	—
新梢粗度 New tip roughness	−0.060	−0.167	0.031	0.010	0.722**	1	—
树高净生长量 Net tree height growth	−0.629**	−0.413	−0.507*	−0.097	0.207	0.173	1

注:** 为极显著水平($P<0.01$),* 为显著水平($P<0.05$)。

Note: ** means extremely significant level($P<0.01$), * means significant level ($P<0.05$).

3 讨论与结论

内源激素对果实生长、油脂的合成和果实的质量起着调控作用[22],施肥可以对内源激素的含量产生影响。本研究结果表明对核桃楸无性系配比施肥后,tZ、GA3、IAA、ABA 内源激素含量得到了显著提高。陈小玲等[12]研究表明,施肥处理后板栗花芽中 IAA、ABA、GA3、Zeatin 含量均比未施肥的含量高。罗帅等[23]研究表明,施氮磷钾肥能提高 ABA 含量,施氮、磷肥可以提高 ZR 和 IAA 的含量。本研究与以上研究结果基本一致。本研究结果表明,影响 tZ 和 GA3 含量的因素重要性排序一致,均为 N>K>P;影响 ABA 和 IAA 含量的因素重要性排序一致,均为 N>P>K;氮肥的施用是提升 4 种内源激素含量最优因素。彭福田等[24]研究表明,施氮对 GA3、IAA、ABA、ZRS 含量及动态变化有较大影响,在果实膨胀期显著提高了 4 种激素的含量。有研究表明果实发育前期多施氮肥和钾肥可以促进果实的快速生长,后期多施磷肥和钾肥可以促进果实的成熟[25-27]。有研究表明,红松在施肥后 ABA 含量得到显著提高,其中氮肥的效果最明显[28]。

董文浩[29]对核桃的研究表明施肥有利于 1 年生新梢枝条的生长;宋斌[16]研究表明不同核桃专用肥施用量对铁核桃生长量影响显著。本研究结果表明 6 月初施肥会对树木生长产生影响,施肥降低了无性系种源内的树高变异,但不同施肥处理间树高的净生长量差异不显著,不同施肥处理对新梢长度和粗度促进作用不明显。这与前人结果存在一些差异,这可能与树木的生长物候存在着一定的关系。刘宏伟等[30]将 1 年生苗木生长过程分为直线上升期(5 月末到 6 月中旬)、曲线上升期(6 月下旬到 8 月初)和平缓上升期(8 月初到 9 月初),说明核桃楸生长存在着分阶段的现象,但是 1 年生苗木的生长情况与幼年树存在差别,难以为本研究提供准确的参考。赵荣慧等[31]观测了 120 株核桃楸幼树发现核桃楸从萌动到开始,生长期有 80 多天。速生期延续到 6 月中旬结束,速生期结束后,生长缓慢。说明这可能是因为施肥时间较晚,加上树体吸收肥料需要一定的时间,错过了核桃楸速生期,导致不同施肥处理差异不显著。

施肥有助于提高核桃楸 tZ、GA_3、ABA 和 IAA 的含量,施肥对 tZ 含量影响最大。提高 tZ 含量的最佳处理组合为氮肥 0.25 kg/株、磷肥 0.3 kg/株、钾肥 0.15 kg/株。提高 GA_3 含量的最佳处理组合为氮肥 0.75 kg/株、磷肥 0.45 kg/株、钾肥 0.15 kg/株。提高 ABA 含量的最佳处理组合氮肥 0.75 kg/株、磷肥 0.45 kg/株、钾肥 0 kg/株。提高 IAA 含量的最佳组合为氮肥 0.75 kg/株、磷肥 0.3 kg/株、钾肥 0.45 kg/株。综合分析提高 4 种内源激素含量的施肥处理组合为氮肥 0.75 kg/株、磷肥 0.3 kg/株、钾肥 0.15 kg/株,可以同时提高 4 种内源激素含量。3 种肥料对内源激素含量的影响不同,氮肥对于 4 种内源激素含量的影响最大。生长方面,6 月初施肥减小了无性系在种源内树高的变异,但对树木生长促进作用不明显。

【参 考 文 献】

[1] 姚妮尔,彭祚登,李春兰,等. 土壤水分对核桃楸幼苗生长和生理特性的影响[J]. 灌溉排水学报,2020,39(S1):1-6.
YAO N E, PENG Z D, LI C L, et al. Effects of soil moisture on growth and physiological characteristics of *Juglans mandshurica* seedlings[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(S1): 1-6.

[2] 唐丽丽,张梅,赵香林,等. 华北地区胡桃楸林分布规律及群落构建机制分析[J]. 植物生态学报,2019,43(9):753-761.
TANG L L, ZHANG M, ZHAO X L, et al. Species distribution and community assembly rules of *Juglans mandshurica* in North China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(9): 753-761.

[3] 张淑媛,杜凤国. 胡桃楸研究现状及保育对策[J]. 北方园艺,2014(9):199-202.
ZHANG S Y, DU F G. The research situation and conservation strategies of *Juglans mandshurica*[J]. Northern Horticulture, 2014(9): 199-202.

[4] 胡旭姣,赵肖君,周奋,等. 山核桃提取物体外抗肿瘤作用研究[J]. 中华中医药学刊,2007,25(2):369-370.
HU X J, ZHAO X J, ZHOU F, et al. The anti-tumor effects of *Carya cathayensis* sarg. extracts *in vitro*[J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2007, 25(2): 369-370.

[5] REGMI A P, LADHA J K, PATHAK H, et al. Yield and soil fertility trends in a 20-year rice-rice-wheat experiment in Nepal[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(3): 857.

[6] 戚燕强,郑听,张子雄,等. 白芨不同器官干物质积累及氮、磷、钾化学计量特征[J]. 江苏农业科学,2022,50

(3):157-162.
QI Y Q, ZHENG T, ZHANG Z X, et al. Study on dry matter accumulation and stoichiometric characteristics of N, P and K in different organs of *Bletilla sfriata*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(3): 157-162.

[7] 王栋,周媛媛,郭路航,等. 冀中地区桃树优质高产的叶片氮磷钾临界值范围及化肥投入量[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(2):269-278.
WANG D, ZHOU Y Y, GUO L H, et al. Leaf NPK concentration requisite and chemical fertilizer inputs for high yield and quality of peach production in central Hebei Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(2): 269-278.

[8] 潘松,史正军,毛晓宁,等. 园林废弃物覆盖材料组分及厚度对土壤化学性质的影响[J]. 西部林业科学,2022,51(5):153-158.
PAN S, SHI Z J, MAO X N, et al. Effects of composition and thickness of green-waste mulches on soil chemical properties[J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(5): 153-158.

[9] 李卓蔚,谷文超,许凌峰,等. 不同产地滇重楼根茎及根际土壤中无机元素含量比较[J]. 西南农业学报,2022,35(10):2343-2352.
LI Z W, GU W C, XU L F, et al. Comparison of inorganic elements in rhizome and rhizosphere soils of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* from different origins[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(10): 2343-2352.

[10] 罗婷,杨文忠,张珊珊. 水培条件下氮磷钾对红椿幼苗生理指标的影响[J]. 西部林业科学,2022,51(1):29-35,48.
LUO T, YANG W Z, ZHANG S S. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on physiological indexes of *Toona ciliata* seedlings under hydroponic culture[J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(1): 29-35, 48.

[11] 秦伟,陈波浪,何琼,等. 不同配比氮、磷、钾施肥对新疆红富士苹果内源激素的影响[J]. 新疆农业大学学报,2012,35(5):373-378.
QIN W, CHEN B L, HE Q, et al. Effects of different ratios of N, P and K fertilizers on endogenous hormone of Xinjiang Fushi apple[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2012, 35(5): 373-378.

[12] 陈小玲,张荣,李琳玲,等. 施肥对花期板栗内源激素含量变化的影响[J]. 湖北农业科学,2015,54(20):4975-4979.
CHEN X L, ZHANG R, LI L L, et al. The effect of fertilization on the changes of endogenous hormone levels in *Castanea mollissima* flowering period[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(20): 4975-4979.

[13] 李歆. 玉米素以及几个精细化工中间体的合成与工艺研究[D]. 太原:山西大学,2004.
LI X. Synthetic and technological study of zeatin and several intermediates of fine chemistry[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2004.

[14] 张泽锟,张辰阳,汪洋,等. 不同质量分数生长素对 Cd 胁迫的香樟幼苗生理生化特性的影响[J]. 东北林业大学学报,2023,51(5):41-47.
ZHANG Z K, ZHANG C Y, WANG Y, et al. Effects of different auxin content on physiological and biochemical characteristics of *Cinnamomum camphora* seedlings in Cd polluted soil[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(5): 41-47.

[15] 吕祚森. 喷施外源脱落酸对苹果生长发育和果实品质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
LYU Z S. Effects of exogenous ABA spraying on apple growth and fruit quality[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.

[16] 宋斌. 专用肥不同施用量对黄棕壤上铁核桃树体养分、产量及品质的影响[D]. 贵阳:贵州大学,2020.
SONG B. Effects of different application rates of special fertilizer on nutrients, yield and quality of *J. sigillata* on yellow brown soil[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.

[17] 果冲. 雌雄异型异熟胡桃楸生殖生物学的初步研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2020.
GUO C. Preliminary research of reproductive biology of *Juglans mandshurica* Maxim. heterodichogamy[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.

[18] 秦柏婷,蔡佳友,傅靖棋,等. 胡桃楸不同发育器官内源激素的动态变化[J]. 分子植物育种,2022,20(15):5130-5137.
QIN B T, CAI J Y, FU J Q, et al. Dynamic changes of endogenous hormones in different developmental organs of *Juglans mandshurica*[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(15): 5130-5137.

[19] 沙波. 内源激素、水分和氮磷钾含量与银杏大小年结实的关系[D]. 南宁:广西大学,2006.
SHA B. The relationship between biennial fruiting and contents of endogenous hormones, moisture, nitrogen, phosphorus and potassium of *Ginkgo biloba*[D]. Nanning: Guangxi University, 2006.

[20] 及利,卢艳,杨雨春,等. 施肥方式对核桃楸容器苗生长及根系养分累积的影响[J]. 西北林学院学报,2020,35(4):76-83.

JI L, LU Y, YANG Y C, et al. Effects of fertilization methods on the growth and root nutrient accumulation of *Juglans mandshurica* container seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4): 76-83.

[21] 刘斗南,谢晨阳,申澜懿,等. 胡桃楸幼苗生长和光合特性对配比施肥的响应[J]. 分子植物育种,2023,21(21):7193-7200.
LIU D N, XIE C Y, SHEN L Y, et al. Response of growth and photosynthetic characteristics of *Juglans mandshurica* maxim. seedlings under fertilization[J]. Molecular Plant Breeding, 2023, 21(21): 7193-7200.

[22] 廖明安,刘旭,邓国涛,等. 梨2个品种果实发育期间内源激素含量的变化[J]. 果树学报,2009,26(1):25-31.
LIAO M A, LIU X, DENG G T, et al. Studies on the changes of endogenous hormones during fruit growth and development of two pear cultivars[J]. Journal of Fruit Science, 2009, 26(1): 25-31.

[23] 罗帅,钟秋平,葛晓宁,等. 不同氮、磷、钾施肥配比对油茶花芽分化的影响[J]. 林业科学研究,2019,32(2):131-138.
LUO S, ZHONG Q P, GE X N, et al. Effect of N, P, K fertilization proportion on flower bud differentiation of *Camellia oleifera*[J]. Forest Research, 2019, 32(2): 131-138.

[24] 彭福田,姜远茂,顾曼如,等. 氮素对苹果果实内源激素变化动态与发育进程的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2003,9(2):208-213.
PENG F T, JIANG Y M, GU M R, et al. Effect of nitrogen on apple fruit hormone changing trends and development[J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 2003, 9(2): 208-213.

[25] 王际轩. 植物激素及其在提高果品产、质量中的应用[J]. 北方果树,2012(2):50-53.
WANG J X. Plant hormones and their application in improving fruit yield and quality[J]. Northern Fruits, 2012(2): 50-53.

[26] 李明,郝建军,于洋,等. 脱落酸(ABA)对苹果果实着色相关物质变化的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2005,36(2):189-193.
LI M, HAO J J, YU Y, et al. Effects of abscisic acid on the color of Hanguang apple fruit[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2005, 36(2): 189-193.

[27] 高英,张志宏. 激素调控果树花芽分化的研究进展[J]. 经济林研究,2009,27(2):141-146.
GAO Y, ZHANG Z H. Progress of hormone regulation on flower bud differentiation of fruit trees[J]. Nonwood Forest Research, 2009, 27(2): 141-146.

[28] 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 X, YANG W C, CAO Z Y, et al. Effects of fertilization on physiology and hormones of *Pinus koraiensis* clones[J]. Forest Engineering, 2023, 39(2): 22-29.

[29] 董文浩. 施肥对'香玲'核桃生长及光合的影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
DONG W H. Study on the effect of fertilization on growth and photosynthesis of 'Xiang ling' walnut[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.

[30] 刘宏伟,祝清超. 核桃楸1年生播种苗苗木生长节律分析[J]. 林业科技,2018,43(2):7-9.
LIU H W, ZHU Q C. Growth rhythm analysis of one-year-old *Juglans mandshurica* seedlings[J]. Forestry Science & Technology, 2018, 43(2): 7-9.

[31] 赵荣慧,胡承海,何福广,等. 核桃楸生长规律的研究[J]. 辽宁林业科技,1985(2):15-21.
ZHAO R H, HU C H, HE F G, et al. Study on the growth law of *Juglans mandshurica*[J]. Liaoning Forestry Science and Technology, 1985(2): 15-21.