

植物生长调节剂对薄壳山核桃品种‘波尼’ 枝条生长和叶片碳氮代谢物积累的影响

冯 刚, 李小飞, 邓秋菊, 陈文静, 彭方仁^①

(南京林业大学林学院, 江苏 南京 210037)

摘要:以5年生薄壳山核桃品种‘波尼’(*Carya illinoensis* ‘Pawnee’)幼树为实验材料,根据 $L_9(3^3)$ 正交试验设计进行3因子(包括植物生长调节剂的种类、质量浓度和喷施次数)3水平(植物生长调节剂分别为 GA_3 、 PP_{333} 和6-BA,植物生长调节剂质量浓度分别为100、200和300 $mg \cdot L^{-1}$,植物生长调节剂喷施次数分别为1、2和3)叶面喷施实验,研究不同处理对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条生长和叶片碳氮代谢物积累的影响。结果表明: GA_3 处理组薄壳山核桃品种‘波尼’枝条长度较CK(对照,蒸馏水喷施3次)组显著增加,其中,T2(200 $mg \cdot L^{-1}$ GA_3 喷施2次)处理组的枝条长度最大,较CK组增加了35.7%; PP_{333} 处理组的枝条粗度总体上较CK组显著增加,其中,T5(200 $mg \cdot L^{-1}$ PP_{333} 喷施1次)处理组的枝条粗度最大,较CK组增加了23.8%。处理后30~90 d,所有处理组薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片中可溶性糖含量均呈逐渐升高的变化趋势,而叶片中淀粉和可溶性蛋白质含量以及C/N比总体上呈先升高后降低的变化趋势。 PP_{333} 和6-BA处理组叶片中可溶性糖、淀粉和可溶性蛋白质含量以及C/N比总体上显著高于CK组,其中,T5和T6(300 $mg \cdot L^{-1}$ PP_{333} 喷施2次)处理组对叶片中可溶性糖和淀粉含量以及C/N比的促进效果较佳,而T4(100 $mg \cdot L^{-1}$ PP_{333} 喷施3次)和T8(200 $mg \cdot L^{-1}$ 6-BA 喷施3次)处理组对叶片中可溶性蛋白质含量的促进效果较佳。极差分析结果表明:植物生长调节剂种类对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条长度、叶片中可溶性糖和淀粉含量以及叶片C/N比的影响最大,植物生长调节剂喷施次数对枝条粗度和叶片中可溶性蛋白质含量的影响最大。研究结果显示:叶面喷施200 $mg \cdot L^{-1}$ GA_3 对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条伸长的促进效果最佳,喷施200 $mg \cdot L^{-1}$ PP_{333} 对枝条增粗及叶片碳氮代谢物积累的促进效果最佳。

关键词:薄壳山核桃品种‘波尼’;植物生长调节剂;枝条;生长;碳氮代谢物

中图分类号: S482.8; S664.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2018)03-0049-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2018.03.07

Effects of plant growth regulators on branch growth and leaf carbon-nitrogen metabolite accumulation of *Carya illinoensis* ‘Pawnee’ FENG Gang, LI Xiaofei, DENG Qiuju, CHEN Wenjing, PENG Fangren^① (College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2018, 27(3): 49-55

Abstract: Taking 5-year-old young trees of *Carya illinoensis* ‘Pawnee’ as experimental materials, foliar spraying experiment with three factors (including type, mass concentration, and spraying times of plant growth regulators) and three levels (plant growth regulators of GA_3 , PP_{333} , and 6-BA, respectively; mass concentrations of plant growth regulators of 100, 200, and 300 $mg \cdot L^{-1}$, respectively; spraying plant growth regulators once, twice, and thrice, respectively) was conducted according to $L_9(3^3)$ orthogonal experimental design to study the effects of different treatments on branch growth and leaf carbon-nitrogen metabolite accumulation of *C. illinoensis* ‘Pawnee’. The results show that branch length of *C. illinoensis* ‘Pawnee’ in GA_3 treatment groups increases significantly compared

收稿日期: 2017-10-09

基金项目: 江苏省林业三新工程项目(LYSX[2016]44); 国家林业局‘948’项目(2015-4-16); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 冯 刚(1992—),男,安徽马鞍山人,硕士研究生,主要从事经济林栽培方面的研究。

^①通信作者 E-mail: frpeng@njfu.edu.cn

with that in CK (the control, spraying distilled water thrice) group, in which, branch length in T2 (spraying $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ GA}_3$ twice) treatment group is the largest, with an increase of 35.7% compared with that in CK group; branch diameter in PP_{333} treatment groups increases significantly compared with that in CK group in general, in which, branch diameter in T5 (spraying $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ PP}_{333}$ once) treatment group is the largest, with an increase of 23.8% compared with that in CK group. During 30–90 d after treatment, soluble sugar content in leaves of branches of *C. illinoensis* ‘Pawnee’ in all treatment groups shows a tendency to increase gradually, while contents of starch and soluble protein and C/N ratio in leaves show a tendency to first increase and then decrease in general. Contents of soluble sugar, starch and soluble protein and C/N ratio in leaves in PP_{333} and 6-BA treatment groups are significantly higher than those in CK group in general, in which, T5 and T6 (spraying $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ PP}_{333}$ twice) treatment groups have good promotion effects on contents of soluble sugar and starch and C/N ratio in leaves, while T4 (spraying $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ PP}_{333}$ thrice) and T8 (spraying $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 6-BA thrice) treatment groups have good promotion effects on soluble protein content in leaves. The range analysis result shows that type of plant growth regulators has the greatest influence on branch length, contents of soluble sugar and starch in leaves, and C/N ratio of leaves of *C. illinoensis* ‘Pawnee’, while spraying times of plant growth regulators do on branch diameter and soluble protein content in leaves. It is suggested that foliar spraying $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ GA}_3$ has the best promotion effect on elongation of branches, while spraying $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ PP}_{333}$ does on thickening of branches and accumulation of carbon-nitrogen metabolite in leaves of *C. illinoensis* ‘Pawnee’.

Key words: *Carya illinoensis* ‘Pawnee’; plant growth regulator; branch; growth; carbon-nitrogen metabolite

薄壳山核桃 [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch] 隶属于胡桃科 (Juglandaceae) 山核桃属 (*Carya* Nutt.), 原产于美国和墨西哥北部, 又名美国山核桃、长山核桃, 是集果用、油用和材用为一体的多效益优良树种^[1-2]。虽然薄壳山核桃在国内的引种栽培时间已超过 100 a, 但由于其营养生长周期长、开花结果时间晚, 且长期以来相关基础理论研究薄弱、栽培管理不科学, 其产量和经济效益较低, 严重打击了种植户的积极性, 产业化进程十分缓慢^[3]。控制薄壳山核桃的营养生长、促进其生殖生长以及缩短其投产年限是当前需要重点解决的问题。

植物生长调节剂可以通过调节植物体内的新陈代谢, 达到控制营养生长、促进开花结果及提高产量等目的, 较传统栽培方式更具优势^[4]。近年来, 植物生长调节剂在薄壳山核桃上的应用研究主要集中在种子萌发^[5-6]、扦插生根^[7-8]和组织培养^[9-10]等方面, 而在树势调控方面的研究却较少, 且生产中尚无快速有效的调控方法。为了有效利用植物生长调节剂进行化学调控, 本研究采用 $L_9(3^3)$ 正交试验设计探索植物生长调节剂不同种类、质量浓度和喷施次数对薄壳山核桃品种‘波尼’ (‘Pawnee’) 幼树枝条 (新梢) 生长和叶片碳氮代谢物积累的影响, 以期获得控制树势和提高枝条结果潜力的最佳处理组合, 为薄壳山核

桃早产丰产实践提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试材料为 5 年生薄壳山核桃品种‘波尼’幼树, 于 2015 年 5 月至 11 月在南京绿宙薄壳山核桃科技有限公司六合基地果园 (地理坐标为北纬 $32^{\circ}19'$ 、东经 $118^{\circ}53'$) 进行实验。实验地属亚热带湿润气候, 年平均气温 15.3°C , 年平均降水量 $1\ 013 \text{ mm}$, 年平均日照时数 $2\ 122 \text{ h}$, 无霜期 224 d ; 海拔 170 m ; 土壤中性偏酸。

1.2 方法

1.2.1 处理方法 挑选健康且长势基本一致的幼树, 按照地理方位东、南、西、北在植株中上部树冠外围选取长势相近的枝条 (新梢), 每个方位选取 3 个枝条, 共计 12 个枝条挂牌标记, 于 2015 年 5 月至 6 月晴朗无风时叶面喷施植物生长调节剂, 每次喷施间隔 15 d 。采用 $L_9(3^3)$ 正交试验设计, 设置植物生长调节剂的种类、质量浓度和喷施次数 3 个因子, 每个因子 3 个水平 (表 1)。各处理组每次喷施 1.5 L 相应的植物生长调节剂溶液。以喷施 3 次等体积蒸馏水作为 CK (对照) 组。以单株为小区, 每处理 3 株, 视为 3 次重复。

表1 薄壳山核桃品种‘波尼’喷施植物生长调节剂的正交试验设计
Table 1 Orthogonal experimental design on spraying plant growth regulators on *Carya illinoensis* ‘Pawnee’

处理 Treatment	因子及水平 ¹⁾ Factor and level ¹⁾		
	A	B/(mg · L ⁻¹)	C
T1(A ₁ B ₁ C ₁)	GA ₃	100	1
T2(A ₁ B ₂ C ₂)	GA ₃	200	2
T3(A ₁ B ₃ C ₃)	GA ₃	300	3
T4(A ₂ B ₁ C ₃)	PP ₃₃₃	100	3
T5(A ₂ B ₂ C ₁)	PP ₃₃₃	200	1
T6(A ₂ B ₃ C ₂)	PP ₃₃₃	300	2
T7(A ₃ B ₁ C ₂)	6-BA	100	2
T8(A ₃ B ₂ C ₃)	6-BA	200	3
T9(A ₃ B ₃ C ₁)	6-BA	300	1

¹⁾ A: 植物生长调节剂种类 Type of plant growth regulators; B: 植物生长调节剂质量浓度 Mass concentration of plant growth regulators; C: 植物生长调节剂喷施次数 Spraying times of plant growth regulators.

1.2.2 枝条生长指标和叶片碳氮代谢物指标测定
在所有处理完成后的30、60和90 d分别测量枝条的生长指标。用卷尺(精度0.1 cm)测量枝条长度,用电子游标卡尺(精度0.01 mm)测量枝条基部的直径,即枝条粗度。

采集枝条顶芽以下第2至第4节位之间羽状复叶的第3至第4对叶片,以单株为单位混合取样,对叶片碳氮代谢物指标进行测定。其中,叶片可溶性糖和淀粉含量采用蒽酮比色法^{[11]195-197}进行测定,可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝G-250染色法^{[11]184-185}进行测定,总氮含量采用微量凯氏法^{[11]186-191}进行测定,并根据公式“C/N比=(可溶性糖含量+淀粉含量)/总氮含量”^[12]计算C/N比。所有指标重复测定3次。

1.3 数据分析

采用EXCEL 2013软件进行数据统计,采用SPSS 19.0统计分析软件中的Duncan's新复极差法进行差异显著性分析,采用极差分析法(R法)对正交试验结果进行极差分析。

2 结果和分析

2.1 不同植物生长调节剂处理对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条生长的影响

不同植物生长调节剂处理对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条长度和粗度的影响见表2。由表2可见:T2(200 mg · L⁻¹ GA₃ 喷施2次)处理组枝条长度最

大,其次为T3(300 mg · L⁻¹ GA₃ 喷施3次)处理组,分别较CK(对照,蒸馏水喷施3次)组显著增加了35.7%和27.4%;此外,T1(100 mg · L⁻¹ GA₃ 喷施1次)和T8(200 mg · L⁻¹ 6-BA 喷施3次)处理组的枝条长度也较CK组显著增加。

由表2还可见:T5(200 mg · L⁻¹ PP₃₃₃ 喷施1次)处理组枝条粗度最大,其次为T7(100 mg · L⁻¹ 6-BA 喷施2次)处理组,分别较CK组显著增加了23.8%和22.7%;此外,T1、T2和T6(300 mg · L⁻¹ PP₃₃₃ 喷施2次)处理组的枝条粗度也较CK组显著增加,分别较CK组增加了20.6%、12.3%和18.3%。

极差分析结果显示:植物生长调节剂种类对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条长度的影响最大,其次为植物

表2 不同植物生长调节剂处理对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条长度和粗度的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 2 Effects of different plant growth regulator treatments on length and diameter of branches of *Carya illinoensis* ‘Pawnee’ ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 Treatment	枝条长度/cm Branch length	枝条粗度/mm Branch diameter
CK	53.2 ± 2.5ef	11.43 ± 1.32d
T1(A ₁ B ₁ C ₁)	62.5 ± 2.4c	13.78 ± 1.17ab
T2(A ₁ B ₂ C ₂)	72.2 ± 2.6a	12.84 ± 1.23bc
T3(A ₁ B ₃ C ₃)	67.8 ± 3.2b	12.18 ± 1.65cd
T4(A ₂ B ₁ C ₃)	55.0 ± 1.9ef	12.42 ± 0.98cd
T5(A ₂ B ₂ C ₁)	51.9 ± 2.3f	14.15 ± 1.13a
T6(A ₂ B ₃ C ₂)	55.9 ± 3.2ef	13.52 ± 0.92ab
T7(A ₃ B ₁ C ₂)	56.2 ± 2.3de	14.03 ± 0.90a
T8(A ₃ B ₂ C ₃)	60.5 ± 1.9cd	11.91 ± 1.37cd
T9(A ₃ B ₃ C ₁)	52.1 ± 2.4ef	11.50 ± 1.26d
K _{A₁}	67.5	12.93
K _{A₂}	54.3	13.36
K _{A₃}	56.2	12.48
R	13.2	0.88
K _{B₁}	57.9	13.41
K _{B₂}	61.5	12.97
K _{B₃}	58.6	12.40
R	3.6	1.01
K _{C₁}	55.5	13.14
K _{C₂}	61.4	13.46
K _{C₃}	61.1	12.17
R	5.9	1.29

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$). CK: 对照,蒸馏水喷施3次 The control, spraying distilled water thrice. A₁, A₂, A₃: 分别为GA₃, PP₃₃₃和6-BA Representing GA₃, PP₃₃₃, and 6-BA, respectively; B₁, B₂, B₃: 植物生长调节剂质量浓度分别为100, 200和300 mg · L⁻¹ Representing mass concentrations of plant growth regulators of 100, 200, and 300 mg · L⁻¹, respectively; C₁, C₂, C₃: 植物生长调节剂喷施次数分别为1, 2和3 Representing spraying plant growth regulators once, twice, and thrice, respectively.

生长调节剂喷施次数;植物生长调节剂喷施次数对枝条粗度的影响最大,其次为植物生长调节剂质量浓度。

2.2 不同植物生长调节剂处理对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片碳氮代谢物指标的影响

不同植物生长调节剂处理对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片中可溶性糖和淀粉含量的影响见表3,对其叶片中可溶性蛋白质含量和C/N比的影响见表4。

2.2.1 对可溶性糖含量的影响 由表3可见:处理后30~90 d,所有处理组薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片中可溶性糖含量均呈逐渐升高的变化趋势,且处理后90 d,所有处理组叶片中可溶性糖含量均高于CK(对照,蒸馏水喷施3次)组。处理后30 d,T5(200 mg · L⁻¹ PP₃₃₃喷施1次)处理组叶片中可溶性糖含量

最高,较CK组显著升高了40.0%;且除T1(100 mg · L⁻¹ GA₃喷施1次)、T2(200 mg · L⁻¹ GA₃喷施2次)和T8(200 mg · L⁻¹ 6-BA喷施3次)处理组叶片中可溶性糖含量低于CK组或与CK组差异不显著外,其余处理组叶片中可溶性糖含量均显著高于CK组。处理后60和90 d,T6(300 mg · L⁻¹ PP₃₃₃喷施2次)处理组叶片中可溶性糖含量均最高,分别较CK组显著升高了38.0%和37.4%。总体上看,T4(100 mg · L⁻¹ PP₃₃₃喷施3次)、T5和T6处理组对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片中可溶性糖含量的促进作用较显著。

极差分析结果显示:植物生长调节剂种类对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片中可溶性糖含量的影响最大,植物生长调节剂质量浓度的影响次之,影响最小的为植物生长调节剂喷施次数。

表3 不同植物生长调节剂处理对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片中可溶性糖和淀粉含量的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 3 Effects of different plant growth regulator treatments on contents of soluble sugar and starch in leaves of branches of *Carya illinoensis* ‘Pawnee’ ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 Treatment	处理后不同时间的可溶性糖含量/(mg · g ⁻¹) Content of soluble sugar at different times after treatment			处理后不同时间的淀粉含量/(mg · g ⁻¹) Content of starch at different times after treatment		
	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d
CK	41.18±2.16de	50.71±1.89c	55.16±2.67f	28.46±1.45e	38.46±2.72ef	15.79±0.73g
T1(A ₁ B ₁ C ₁)	38.52±3.15f	49.26±4.28c	59.53±3.16ef	35.48±1.02cd	41.14±3.56de	22.56±1.05ef
T2(A ₁ B ₂ C ₂)	44.84±1.48cd	52.99±2.41c	66.55±3.48cd	29.72±2.56e	49.64±0.83c	20.85±1.49f
T3(A ₁ B ₃ C ₃)	49.49±0.94bc	60.12±3.16b	64.24±1.46de	39.41±1.08b	36.14±1.46f	28.31±2.11bc
T4(A ₂ B ₁ C ₃)	56.49±2.47a	65.53±4.70a	72.71±3.72ab	33.78±2.44d	39.64±2.22ef	21.81±3.07f
T5(A ₂ B ₂ C ₁)	57.64±2.56a	67.80±3.46a	73.40±1.13ab	49.15±2.56a	57.14±3.46b	37.99±0.46ab
T6(A ₂ B ₃ C ₂)	46.77±3.47bc	69.99±1.46a	75.80±1.13a	46.43±3.47a	62.92±1.46a	39.21±1.13a
T7(A ₃ B ₁ C ₂)	46.26±1.57bc	59.03±0.76b	64.10±2.43de	40.18±1.57b	59.49±0.76ab	25.03±2.43de
T8(A ₃ B ₂ C ₃)	41.48±1.54de	51.21±1.26c	56.85±1.72f	37.46±1.54bc	45.06±1.26d	25.71±1.72cd
T9(A ₃ B ₃ C ₁)	49.41±3.02b	60.12±3.71b	69.94±0.43bc	33.08±3.02d	54.92±3.71b	25.14±0.73de
K _{A₁}			62.79			23.65
K _{A₂}			73.97			33.00
K _{A₃}			63.63			25.30
R			11.18			9.35
K _{B₁}			65.46			23.14
K _{B₂}			65.26			27.92
K _{B₃}			69.66			30.89
R			4.40			7.75
K _{C₁}			67.64			28.57
K _{C₂}			68.49			28.11
K _{C₃}			64.26			25.28
R			4.23			3.29

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$)。CK: 对照, 蒸馏水喷施3次 The control, spraying distilled water thrice。A₁, A₂, A₃: 分别为GA₃、PP₃₃₃和6-BA Representing GA₃, PP₃₃₃, and 6-BA, respectively; B₁, B₂, B₃: 植物生长调节剂质量浓度分别为100、200和300 mg · L⁻¹ Representing mass concentrations of plant growth regulators of 100, 200, and 300 mg · L⁻¹, respectively; C₁, C₂, C₃: 植物生长调节剂喷施次数分别为1、2和3 Representing spraying plant growth regulators once, twice, and thrice, respectively。

2.2.2 对淀粉含量的影响 由表3还可见:处理后30~90 d,所有处理组薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片中淀粉含量总体上呈先升高后降低的变化趋势,且处理后90 d,所有处理组叶片中淀粉含量均显著高于CK组。处理后30 d,T5处理组叶片中淀粉含量最高,较CK组显著升高了72.7%。处理后60和90 d,T6处理组叶片中淀粉含量均最高,分别较CK组显著升高了63.6%和148.3%。总体上看,T5、T6和T7(100 mg·L⁻¹6-BA喷施2次)处理组对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片中淀粉含量的促进作用较显著。

极差分析结果显示:植物生长调节剂种类对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片中淀粉含量的影响最大,植物生长调节剂质量浓度的影响次之,影响最小的为植物生长调节剂喷施次数。

2.2.3 对可溶性蛋白质含量的影响 由表4可见:处理后30~90 d,所有处理组薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片中可溶性蛋白质含量均呈先升高后降低的变化趋势。处理后30 d,T8处理组叶片中可溶性蛋白质含量最高,较CK组显著升高了192.3%。处理后60和90 d,T4处理组叶片中可溶性蛋白质含量均最高,分别较CK组显著升高了68.8%和87.8%。总体上看,T4和T8处理组对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片中可溶性蛋白质含量的促进作用较显著,而T2和T5处理组叶片中可溶性蛋白质含量低于CK组。

极差分析结果显示:植物生长调节剂喷施次数对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片中可溶性蛋白质含量的影响最大,植物生长调节剂质量浓度的影响次之,影响最小的为植物生长调节剂种类。

表4 不同植物生长调节剂处理对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片中可溶性蛋白质含量和C/N比的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 4 Effects of different plant growth regulator treatments on content of soluble protein and C/N ratio in leaves of branches of *Carya illinoensis* ‘Pawnee’ ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理 Treatment	处理后不同时间的可溶性蛋白质含量/(mg·g ⁻¹) Content of soluble protein at different times after treatment			处理后不同时间的C/N比 C/N ratio at different times after treatment		
	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d
CK	0.26±0.03d	0.96±0.02de	0.49±0.05de	8.86±0.41ef	9.43±0.88e	8.66±0.44cde
T1(A ₁ B ₁ C ₁)	0.46±0.04c	1.18±0.05c	0.68±0.02c	8.42±0.45f	9.77±1.01e	7.52±0.11e
T2(A ₁ B ₂ C ₂)	0.08±0.01e	0.99±0.01de	0.36±0.02fg	9.98±1.01de	11.62±1.20bcd	8.72±0.34cde
T3(A ₁ B ₃ C ₃)	0.39±0.03c	1.01±0.05de	0.50±0.02d	10.81±0.43bcd	13.03±0.35b	9.52±1.15cd
T4(A ₂ B ₁ C ₃)	0.62±0.02b	1.62±0.01a	0.92±0.03a	9.59±0.98ef	9.63±0.66e	9.34±0.88cd
T5(A ₂ B ₂ C ₁)	0.11±0.04e	0.89±0.04e	0.39±0.06efg	13.27±1.24a	14.74±0.21a	13.17±0.14a
T6(A ₂ B ₃ C ₂)	0.16±0.04de	1.32±0.13bc	0.42±0.07def	11.78±0.10b	11.40±0.78cd	13.76±0.99a
T7(A ₃ B ₁ C ₂)	0.58±0.08b	1.10±0.07cd	0.30±0.01g	12.02±0.37ab	12.86±0.64bc	8.34±1.32de
T8(A ₃ B ₂ C ₃)	0.76±0.01a	1.39±0.11b	0.81±0.02b	11.35±0.61bc	11.29±0.11d	11.04±0.13b
T9(A ₃ B ₃ C ₁)	0.22±0.02d	0.90±0.08e	0.70±0.06c	10.02±1.04cde	8.80±0.54e	9.89±0.67c
K _{A₁}			0.51			8.58
K _{A₂}			0.57			12.09
K _{A₃}			0.60			9.78
R			0.09			3.50
K _{B₁}			0.63			8.40
K _{B₂}			0.52			10.99
K _{B₃}			0.54			11.06
R			0.11			2.66
K _{C₁}			0.59			10.19
K _{C₂}			0.36			10.27
K _{C₃}			0.74			9.99
R			0.38			0.28

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$). CK: 对照, 蒸馏水喷施3次 The control, spraying distilled water thrice. A₁, A₂, A₃: 分别为 GA₃, PP₃₃₃ 和 6-BA Representing GA₃, PP₃₃₃, and 6-BA, respectively; B₁, B₂, B₃: 植物生长调节剂质量浓度分别为 100, 200 和 300 mg·L⁻¹ Representing mass concentrations of plant growth regulators of 100, 200, and 300 mg·L⁻¹, respectively; C₁, C₂, C₃: 植物生长调节剂喷施次数分别为 1, 2 和 3 Representing spraying plant growth regulators once, twice, and thrice, respectively.

2.2.4 对 C/N 比的影响 由表 4 还可见:处理后 30~90 d,除 T6、T8 和 T9 (300 mg · L⁻¹ 6-BA 喷施 1 次)处理组外,其他处理组薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片 C/N 比均呈先升高后降低的变化趋势。处理后 30 和 60 d, T5 处理组叶片 C/N 比均最大,较 CK 组显著升高了 49.8%和 56.3%;处理后 90 d, T6 处理组叶片 C/N 比最大,较 CK 组显著升高了 58.9%。总体上看, T5 处理组对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片 C/N 比的提高作用最显著。

极差分析结果显示:植物生长调节剂种类对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片 C/N 比的影响最大,植物生长调节剂质量浓度的影响次之,影响最小的为植物生长调节剂喷施次数。

3 讨 论

植物生长调节剂具有有效提高作物的产量和品质、增加植物抗逆性以及调控植物生长势等作用,在农林生产中应用广泛^[13-14]。已有研究表明:植物生长调节剂对枝条生长的影响显著,在果树的树形调控上具有良好的效果^[15-16]。本研究中, GA₃、PP₃₃₃ 和 6-BA 3 种植物生长调节剂对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条生长有显著影响,其中, GA₃ 和 6-BA 促进枝条伸长效果较好,而 PP₃₃₃ 促进枝条增粗效果较好,与油茶 (*Camellia oleifera* Abel.)^[17]、桔梗 [*Platycodon grandifloras* (Jacq.) A. DC.]^[18] 和薄壳山核桃品种‘马罕’ (‘Mahan’)^[19] 的相关研究结果基本一致。植物生长调节剂对植物的作用往往受其种类和浓度等的影响,如改变浓度不仅可能影响效果还可能起反作用^[15]。本研究中, T1 (100 mg · L⁻¹ GA₃ 喷施 1 次)、T2 (200 mg · L⁻¹ GA₃ 喷施 2 次) 和 T3 (300 mg · L⁻¹ GA₃ 喷施 3 次) 处理组薄壳山核桃品种‘波尼’的枝条长度较大,表明 GA₃ 对枝条伸长的促进效果优于 PP₃₃₃ 和 6-BA。极差分析结果也表明:植物生长调节剂种类对枝条伸长生长的影响最大。T4 (100 mg · L⁻¹ PP₃₃₃ 喷施 3 次)、T5 (200 mg · L⁻¹ PP₃₃₃ 喷施 1 次) 和 T6 (300 mg · L⁻¹ PP₃₃₃ 喷施 2 次) 处理组薄壳山核桃品种‘波尼’的枝条粗度总体上较大,推测原因为 PP₃₃₃ 能有效抑制植物细胞分裂和 GA₃ 合成,并能削弱顶端优势^[20]。而翟敏等^[21] 研究认为,叶面喷施 300 mg · L⁻¹ PP₃₃₃ 对薄壳山核桃容器苗增粗生长的促进效果最好,造成差异的原因可能为薄壳山核桃

苗期和幼树对 PP₃₃₃ 的需求量不同。

植物生长调节剂通过影响植物体内蛋白质和酶等物质的合成,对植物花芽分化、落叶和休眠等生命活动起调控作用^[22]。研究表明:PP₃₃₃ 能够抑制植物营养生长,且在到达顶端分生组织后抑制 GA₃ 的合成,并将同化物质转运,用于生殖生长和花芽形成等^[23-24]。本研究中,喷施 PP₃₃₃ 和 6-BA 总体上显著提高了薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片中可溶性糖、淀粉和可溶性蛋白质的含量,这与郭楠等^[25] 对青钱柳 [*Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinsk.] 和刘静雅等^[26] 对紫穗槐 (*Amorpha fruticosa* Linn.) 的研究结果相符。总体上看,喷施 PP₃₃₃ 促进薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片中碳氮代谢物积累的效果优于 6-BA,但其质量浓度的变化会影响促进效果,因此,喷施 200 mg · L⁻¹ PP₃₃₃ 促进薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片中碳氮代谢物积累的效果较好,但其最佳浓度仍需进行进一步的实验研究。

C/N 比对植物开花有调控作用,特别是对长日照植物, C/N 比增大可促进植物开花^[12]。本研究中,喷施 PP₃₃₃ 和 6-BA 总体上显著提高薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片 C/N 比,促进薄壳山核桃品种‘波尼’的生殖生长。极差分析结果表明:植物生长调节剂种类对薄壳山核桃品种‘波尼’枝条叶片中可溶性糖和淀粉含量以及 C/N 比的影响最大,植物生长调节剂质量浓度的影响次之,植物生长调节剂喷施次数的影响最小,因此,选择合适的植物生长调节剂最重要,其次是对其质量浓度的筛选和优化;而植物生长调节剂喷施次数对叶片中可溶性蛋白质含量的影响较大,植物生长调节剂种类和质量浓度的影响较小。

综上所述,建议在薄壳山核桃幼树营养生长期喷施 GA₃, 促进枝条生长和快速成形。在幼树成形后,为了控制营养生长并加速生殖生长可喷施 PP₃₃₃, 这样不仅有利于枝条增粗,还有利于树体矮化控冠,进而减轻人工修剪工作量,也有助于植株中碳氮代谢物的积累。综合考虑环境和栽培措施等因子的影响,在生产实践过程中建议根据生长阶段喷施 200 mg · L⁻¹ GA₃ 或 PP₃₃₃ 2~3 次,并且在喷施后加强水肥管理等措施,以期达到早产、丰产的目的。由于本研究仅针对薄壳山核桃品种‘波尼’,研究结果有一定局限性,而喷施植物生长调节剂对薄壳山核桃其他品种的影响仍需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 彭方仁,李永荣,郝明灼,等.我国薄壳山核桃生产现状与产业发展策略[J].林业科技开发,2012,26(4):1-4.
- [2] 李永荣,吴文龙,刘永芝,等.薄壳山核桃种质资源的开发利用[J].安徽农业科学,2009,37(27):13306-13308,13316.
- [3] 彭方仁.美国薄壳山核桃产业发展现状及对我国的启示[J].林业科技开发,2014,28(6):1-5.
- [4] ZAFFARI G R, PERES L E P, KERBAUY G B. Endogenous levels of cytokinins, indoleacetic acid, abscisic acid, and pigments in variegated somaclones of micropropagated banana leaves[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 1998, 17: 59-61.
- [5] 李小飞,邓秋菊,曹凡,等.激素浸种对薄壳山核桃种子萌发的影响及其种子吸胀过程中SOD和POD活性变化[J].植物资源与环境学报,2016,25(2):111-113.
- [6] 李俊南,熊新武,习学良,等.植物激素对薄壳山核桃种子萌发及幼苗生长的影响[J].经济林研究,2013,31(1):81-86.
- [7] 黄有军,王正加,郑炳松,等.植物生长调节剂对薄壳山核桃硬枝扦插生根的影响[J].西南林学院学报,2006,26(5):42-44.
- [8] 吴文浩,曹凡,刘壮壮,等.NAA对薄壳山核桃扦插生根过程中内源激素含量变化的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(5):191-196.
- [9] 曹凡,冯刚,谭鹏鹏,等.不同品种薄壳山核桃种胚组织培养研究[J].中南林业科技大学学报,2017,37(8):18-23.
- [10] 杨宏,陈文静,杨标,等.长山核桃茎段组织培养初步研究[J].经济林研究,2017,35(2):220-224.
- [11] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [12] 张翔,翟敏,徐迎春,等.不同修剪措施对薄壳山核桃枝条生长及枝条和叶片碳氮代谢物积累的影响[J].植物资源与环境学报,2014,23(3):86-93.
- [13] SHAHSAVARI E, MAHERAN A A, AKMAR A S N, et al. The effect of plant growth regulators on optimization of tissue culture system in Malaysian upland rice [J]. African Journal of Biotechnology, 2010, 9: 2089-2094.
- [14] ECHEGARARY E R, CLOYD R A. Effects of reduced-risk pesticides and plant growth regulators on rove beetle (Coleoptera: Staphylinidae) adults[J]. Journal of Economic Entomology, 2012, 105: 2097-2106.
- [15] 傅华龙,何天久,吴巧玉.植物生长调节剂的研究与应用[J].生物加工过程,2008,6(4):7-12.
- [16] 王文文,曹雪琴,杨中,等.植物生长调节剂在果树中的应用现状及残留分析方法研究进展[J].现代农业科技,2017(12):129-131.
- [17] 陈显,孙颖,李建安.赤霉素和多效唑对油茶幼株生长的影响[J].经济林研究,2013,31(2):86-90.
- [18] 张小斌.摘蕾打顶与多效唑处理对桔梗生长性状及总皂甙含量的影响[J].安徽农业科学,2008,36(11):4558,4572.
- [19] 张翔,徐永平,李永荣,等.DA-6、PBO、6-BA叶面喷施对薄壳山核桃树体发育的影响[J].中国农学通报,2015,31(7):13-17.
- [20] 张国华,张艳洁,丛日晨,等.赤霉素作用机制研究进展[J].西北植物学报,2009,29(2):412-419.
- [21] 翟敏,徐迎春,董凤祥,等.赤霉素多效唑及摘心对薄壳山核桃容器苗生长的影响[J].林业实用技术,2010(7):11-12.
- [22] 楚爱香,孔祥生,张要战.植物生长调节剂在观赏植物上的应用[J].园艺学报,2004,31(3):408-412.
- [23] RAJALA A, PELTONEN-SAINIO P. Plant growth regulator effects on spring cereal root and shoot growth [J]. Agronomy Journal, 2001, 93: 936-943.
- [24] 王志杰,樊屹松,蔡德义,等.赤霉素和多效唑对天女花移植苗生长的影响[J].河北林果研究,2000,15(4):349-352.
- [25] 郭楠,张颖颖,刘娜娜,等.多效唑对青钱柳苗木生理特性的影响[J].东北林业大学学报,2014,42(4):42-45.
- [26] 刘静雅,李绍才,孙海龙,等.多效唑对紫穗槐生长及生理特性的影响[J].植物科学学报,2016,34(2):271-279.

(责任编辑:张明霞)