

超声波处理对果蔗产量品质及生理特性的影响

李鸿博¹ 严卓晟² 邓权清¹ 颜静婷¹
吴佳¹ 钟坚文² 沈万宽¹

1. 华南农业大学农学院/农业农村部华南地区作物栽培科学观察实验站, 广州 510642;

2. 广州市金稻农业科技有限公司, 广州 510935

摘要 采用处理频率和处理时间双因素试验, 设置6种超声波处理(A:25 kHz, 1 min; B:25 kHz, 3 min; C:25 kHz, 5 min; D:33 kHz, 1 min; E:33 kHz, 3 min; F:33 kHz, 5 min), 以未处理为对照(CK), 研究超声波处理对果蔗产量、品质及生理特性的影响。结果表明: 与对照相比, 超声波处理对果蔗萌芽率、分蘖率、生长速、株高、单茎质量及有效茎数均具有促进作用, 果蔗蔗茎产量增产幅度为10.28%~55.60%, 甘蔗糖分增减幅度为-0.39%~0.79%(绝对值); 可提高果蔗苗期、分蘖期、伸长初期叶片过氧化氢酶、过氧化物酶、超氧化物歧化酶等抗氧化酶活性, 降低叶片质膜丙二醛含量, 增强果蔗抗逆性。筛选出较优超声波处理为33 kHz, 5 min(该处理下蔗茎产量增产55.60%, 甘蔗糖分提高0.31个百分点)。

关键词 果蔗; 超声波; 产量; 品质; 生理特性

中图分类号 S 566.1; S 5-39 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2019)03-0007-06

果蔗即水果型甘蔗, 是一种生长于热带、亚热带地区的特色经济作物。果蔗富含蔗糖、葡萄糖和果糖等糖类及人体所必需的多种氨基酸、维生素和微量元素, 具有丰富的营养和清凉解渴的功效, 深受人们的喜爱^[1-2]。我国果蔗主要种植于南方地区, 果蔗种植面积约25万hm²/年, 果蔗茎产量约2000万t/年, 其中广东、广西、云南、福建等省区是我国果蔗主产区, 占我国果蔗年总产量的90%以上^[3]。我国果蔗品种改良相对滞后, 主栽果蔗品种单一(主要品种为Badila)。由于主栽品种连续种植数十年, 种性退化严重, 单产降低、品质下降, 制约我国果蔗产业的可持续发展。因此, 开展果蔗提质增效关键技术研究, 对促进我国果蔗产业可持续发展、乡村振兴等具有重要意义。

研究表明外界的光、温、水等物理信号的刺激可以促进植物生长^[4-5]。超声波是频率高于20 kHz的声波, 具有良好的方向性和穿透性, 通过改变外界的环境应力, 影响植物的生长发育^[6-8]。超声波可以诱导植物体内大分子的合成和诱导植物发生遗传变异

从而提高酶的活性^[9]。不同超声波处理时间和处理频率可以对植物细胞产生促进或抑制效应, 这种效应体现在种子萌发率的高低和植物的生长方面, 通常以促进效应为主^[10]。在不同温度下, 利用不同频率、不同处理时长的超声波对苦荞麦种子进行处理, 发现超声波处理对苦荞麦种子的初始萌发率影响显著, 还可提高苦荞麦种子体内可溶性糖及黄酮类物质的含量, 从而增强其抗氧化活性, 提高植株对DPPH自由基的清除能力^[11-12]。超声波处理水稻种子对水稻的有效穗数、颖花数和产量均有显著促进效果^[10]。辛星光等^[13]报道20和40 kHz混频超声处理后的不同基因型水稻产量增产幅度为6.62%~10.18%。聂俊等^[15]报道水稻华航31和中华11经超声波处理后产量分别提高了9.23%和6.84%。

超声波处理在植物增产提质方面的机制及应用已有不少研究报道, 主要以菠菜、白菜、小麦、水稻等种子作物的研究较多^[15], 而在以块茎或芽等为繁殖体的无性繁殖作物中研究报道较少, 尤其在以芽为繁殖体的果蔗或糖蔗上尚未见报道。本研究设置不

收稿日期: 2018-08-31

基金项目: 广东省科技计划项目(2015A020209102; 2016A030303049); 广东省现代农业产业技术推广体系(2017LM4166); 广州市科技计划项目(201604020087)

李鸿博, 硕士研究生。研究方向: 甘蔗栽培生理。E-mail: lihongbo88888@163.com

通信作者: 沈万宽, 博士, 研究员。研究方向: 甘蔗抗病育种与栽培生理。E-mail: wkshen69@126.com

同频率、不同处理时间超声波处理,探究超声波处理对果蔗产量品质及生理特性的影响,旨在为超声波技术在果蔗生产中的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验果蔗品种为 Badila(我国主栽果蔗品种),由华南农业大学甘蔗育种基地提供。

1.2 试验设计与种植

试验于 2017—2018 年在广州市增城区华南农业大学甘蔗科研基地进行。试验地为水旱田,前作红薯,地力均匀,肥力中等以上。选取长势相当的蔗茎,蔗芽新鲜、饱满、无病虫害的节段作为蔗种。采用不同处理频率和不同处理时间双因素试验,超声波处理采用由广州市金稻农业科技有限公司自主研发的植物种子超声波处理机处理,共设置 6 种处理(A:25 kHz、1 min;B:25 kHz、3 min;C:25 kHz、5 min;D:33 kHz、1 min;E:33 kHz、3 min;F:33 kHz、5 min),以未处理为对照(CK)。小区行长 5 m,行距 1 m,3 行区,15 m²/小区,3 次重复。2017 年 5 月 10 日种植,下种量 18 双芽段/行(即 3 666 双芽段/hm²),2018 年 3 月 2 日收获。田间管理按照当地果蔗大田生产进行。

1.3 测定项目及方法

1)主要农艺性状测定。在果蔗萌芽盛期和分蘖盛期分别测定萌芽率和分蘖率,在大伸长期至成熟期分别测定生长速、株高、茎径、有效茎数、糖锤度、

甘蔗蔗糖分及蔗茎产量。测定方法参考文献[46]。

2)生理特性测定。在果蔗幼苗期、分蘖期、伸长初期分别采集+1 片嫩叶约 1 g,超低温保存备用。分别测定叶片丙二醛(MDA)含量^[17]、超氧化物歧化酶(SOD)^[18]、过氧化物酶(POD)^[19]、过氧化氢酶(CAT)^[20]的活性。

3)数据处理与分析方法。采用 IBM SPSS 24.0 和 Excel 2016 数据分析软件进行数据输入和统计分析。

2 结果与分析

2.1 超声波处理对果蔗农艺性状的影响

由表 1 可知,超声波处理后各处理萌芽率从高到低依次为 F>E>B>C>CK>D>A,其中 F、E、B、C 处理比 CK 分别提高 5.08%、4.13%、1.27% 和 0.01%,F、A 处理和 CK 差异达显著水平,其余处理与 CK 间差异不显著。在分蘖率方面,各处理从高到低依次为 A>B>C>E>F>D>CK,依次较 CK 提高 184.14%、120.12%、79.07%、63.42%、44.15% 和 20.34%,A 处理与 D、F 处理、CK 间差异达显著水平,D 处理与 B、C 处理间差异显著,F 处理与 B、C 处理间差异显著。在生长速方面,各处理 8 月及 10 月的生长速与 CK 差异未达显著水平;各处理 9 月份的生长速均比 CK 高,且差异达显著水平,生长速从高到低顺序为 F>E>A>D>C>B>CK,分别较 CK 提高 0.67、0.43、0.33、0.30、0.23 和 0.19 cm/d,各处理和 CK 差异皆达显著水平。

表 1 超声波处理对果蔗萌芽率、分蘖率和生长速的影响

Table 1 Effect of ultrasonic treatment on seedling emergence rate, tillering rate and growth rate of chewing cane

处理 Treatment	萌芽率/% Budding rate	分蘖率/% Tillering rate	生长速/(cm/d) Growth rate		
			8月 Aug.	9月 Sep.	10月 Oct.
A	61.59±0.64b	542.05±23.18a	0.97±0.06a	1.45±0.08ab	1.13±0.03a
B	70.79±4.99ab	478.03±34.32ab	1.05±0.20a	1.31±0.08b	1.13±0.09a
C	69.53±3.61ab	436.98±55.70ab	1.03±0.04a	1.35±0.08b	1.14±0.03a
D	68.25±4.61ab	378.25±77.62bc	0.94±0.08a	1.42±0.10b	1.10±0.04a
E	73.65±5.11ab	421.33±36.01abc	0.93±0.05a	1.55±0.18ab	1.14±0.08a
F	74.60±1.14a	402.06±24.48bc	0.91±0.12a	1.79±0.14a	1.21±0.03a
CK	69.52±3.81b	357.91±23.65bc	1.06±0.13a	1.12±0.15c	1.11±0.08a

注:同列数据后不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。Note: Values followed by different letters in same column mean significant at 5% levels. The same as follows.

2.2 超声波处理对果蔗茎产量及构成因素的影响

株高、茎径、单茎质量及有效茎数均为果蔗的产量构成因素,直接决定果蔗产量的高低。由表 2 可知,株高从高到低依次为 F>B>A>E>CK>D>

C、F、B、A、E 依次比 CK 高 10.32、4.9、0.6、0.34 cm, D、C 较 CK 矮 0.45 和 1.04 cm,仅 F 处理与 CK 间株高差异显著,其他处理与 CK 差异未达显著水平。茎径从大到小依次为 F>A=B=CK>C>E>D,

仅 F 处理比 CK 增大 0.08 cm, C、E、D 处理依次比 CK 减小 0.07、0.10、和 0.13 cm, 各处理与 CK 差异未达显著水平。单茎质量从大到小依次为 F>A>B>E>CK>D=C, 其中 F、A、B、E 处理比 CK 分别提高 24.04%、7.69%、6.73% 和 3.85%, 仅 F 处理与 CK 间差异达显著水平, 其他处理与 CK 差异未达显著水平。有效茎数从多到少依次为 F=B>

E>D>C>A>CK, 分别比 CK 增加 10 672.05、10 672.05、7 336.95、5 335.95、4 669.05 和 1 333.95 条, 除 A 处理与 CK 差异不显著外, 其他处理均与 CK 差异达显著水平。蔗茎产量从高到低依次为 F>B>E>D>A>C>CK, 分别比 CK 处理增产 55.60%、33.74%、22.30%、11.72%、11.45% 和 10.28%, 其中 F、B、E 处理与 CK 差异达显著水平,

表 2 超声波处理对果蔗茎产量及其构成因素的影响

Table 2 Effect of ultrasonic treatment on cane yield and its components of chewing cane

处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎径/cm Stalk diameter	单茎质量/kg Single stem weight	每公顷有效茎数 Effective stem number	蔗茎产量/(kg/hm ²) Cane yield
A	146.80±1.75b	3.50±0.09a	1.12±0.02ab	43 354.95±44.47d	48 664.05±5.55bc
B	151.10±2.30ab	3.50±0.08a	1.11±0.11ab	52 693.05±44.47a	58 392.30±363.57ab
C	145.16±1.95b	3.43±0.09bc	1.03±0.06b	46 690.05±44.47c	48 151.95±237.05bcd
D	145.75±1.46b	3.37±0.10c	1.03±0.02b	47 356.95±44.47c	48 778.05±27.82bc
E	146.54±2.58b	3.40±0.07c	1.08±0.10ab	49 357.95±44.47b	53 398.35±287.92b
F	156.52±2.31a	3.58±0.08a	1.29±0.11a	52 693.05±44.47ab	67 937.55±393.80a
CK	146.20±2.08b	3.50±0.14ab	1.04±0.07b	42 021.00±77.02d	43 662.6±122.17cd

其余处理与 CK 差异未达显著水平。

2.3 超声波处理对果蔗品质的影响

从表 3 可以看出, 锤度由高到低顺序为 B>F>CK>A>E>C 或 D, B、F 比分别比 CK 提高 0.73、0.29 个百分点, A、E、C(D) 分别比 CK 降低 0.11、0.13、0.36 个百分点, 各处理与 CK 差异未达显著水平。甘蔗蔗糖分从高到低依次为 B>F>CK>A>E>C=D, B、F 分别比 CK 提高 0.79、0.31 个百分点, A、E、C、D 分别比 CK 降低了 0.12、0.15、0.39、0.39 个百分点, 各处理与 CK 差异未达显著水平。

表 3 超声波处理对果蔗品质的影响

Table 3 Effect of ultrasonic treatment on the quality of chewing cane

处理 Treatment	锤度/% Brix	甘蔗蔗糖分/% Sucrose content
A	17.09±0.20a	10.80±0.22a
B	17.93±0.38a	11.71±0.42a
C	16.84±0.49a	10.53±0.53a
D	16.84±0.31a	10.53±0.34a
E	17.07±0.27a	10.77±0.29a
F	17.49±0.26a	11.23±0.28a
CK	17.20±0.73a	10.92±0.79a

2.4 超声波处理对果蔗叶片生理特性的影响

1) 超声波处理对果蔗叶片丙二醛(MDA)含量的影响。如表 4 所示, 在幼苗期, 叶片 MDA 含量从高到低依次为 A>CK>B>D>C>E>F, 其中, 仅 A 处理比 CK 提高 2.29%, 其余处理依次比 CK 降低 7.25%、26.34%、33.20%、38.16% 和 40.46%, 各处理的 MDA 含量均与 CK 无显著差异; 在分蘖期, 叶片 MDA 含量从高到低依次为 E>A=CK>F>

B=C>D, 除 E 处理比 CK 提高 11.41% 之外, 其余处理的 MDA 含量依次较 CK 降低 4.70%、15.44%、15.44% 和 19.46%, 且各处理与 CK 均无显著差异; 在伸长初期, 叶片 MDA 含量从高到低依次为 CK>D=F>E>C>B>A, 依次比 CK 降低 5.55%、5.55%、7.87%、11.02%、12.60% 和 20.47%, 仅 A 处理与 CK 达显著差异水平, 其余处理与 CK 间未达显著差异水平。

表 4 超声波处理对果蔗 MDA 含量的影响

Table 4 Effect of ultrasonic treatment on MDA content in the growth period of chewing cane $\mu\text{mol/g}$

处理 Treatment	幼苗期 Seedling stage	分蘖期 Tillering stage	伸长初期 Early jointing stage
A	2.68±0.72a	1.49±0.21a	1.01±0.08c
B	2.43±0.29a	1.26±0.11a	1.11±0.01bc
C	1.75±0.08ab	1.26±0.03a	1.13±0.09bc
D	1.93±0.09ab	1.20±0.04a	1.20±0.10bc
E	1.62±0.09ab	1.66±0.33a	1.17±0.08bc
F	1.56±0.20ab	1.42±0.10a	1.20±0.05bc
CK	2.62±0.58a	1.49±0.03a	1.27±0.03ab

2) 超声波处理对果蔗叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响。由表 5 看出, 在幼苗期, 叶片 SOD 活性从高到低依次为 C>D>F>B>A>E>CK, 依次比 CK 提高 30.30%、25.51%、24.78%、23.57%、18.88% 和 13.75%, 仅 E 处理与 CK 间株高差异不显著, 其他处理与 CK 差异均达显著水平; 在分蘖期, 叶片 SOD 活性从高到低依次为 F>D>C>E>B>A>CK, 依次比 CK 处理提高 42.92%、39.00%、36.44%、29.18%、24.79% 和 23.08%, 各处

理与 CK 皆达显著差异;在伸长初期,叶片 SOD 活性从高到低依次为 $F > E > D > B > C > CK > A$, 依次比 CK 提高 40.95%、23.22%、17.47%、0.03% 和 9.33% 及降低了 1.16%, 只有 F 处理与 CK 差异显著, 其他处理与 CK 差异未达显著水平。

表 5 超声波处理对果蔗 SOD 活性的影响

Table 5 Effect of ultrasonic treatment on SOD activity in the growth period of chewing cane U/g

处理 Treatment	幼苗期 Seedling stage	分蘖期 Tillering stage	伸长初期 Early jointing stage
A	169.6±1.62a	252.74±17.85a	140.12±3.53b
B	176.29±24.25a	256.25±17.27a	155.98±5.78b
C	185.88±0.47a	280.17±10.22a	154.99±14.80b
D	179.05±5.52a	285.43±4.01a	166.53±4.65ab
E	162.27±7.31ab	265.28±8.62a	174.67±13.99ab
F	178.01±4.18a	293.49±6.66a	199.81±9.98a
CK	142.66±8.10b	205.35±15.83b	141.76±1.23b

3) 超声波处理对果蔗叶片过氧化氢酶(CAT)活性的影响。如表 6 所示,在幼苗期,叶片 CAT 活性从高到低依次为 $D > A > B > C > E > F > CK$, 依次比 CK 提高了 139.01%、101.43%、78.90%、73.50%、48.40% 和 20.49%, D 处理和 CK 间达显著差异, 其他处理与 CK 未达显著差异;在分蘖期,叶片 CAT 活性从高到低依次为 $C > F > D > CK > E > B > A$, C、F、D 比 CK 分别提高 21.10%、6.72% 和 2.49%, E、B、A 分别比 CK 降低 8.59%、10.89% 和 12.90%, 各处理与 CK 差异未达显著水平;在伸长初期,叶片 CAT 活性从高到低依次为 $D > E > B > C > A > F > CK$, 依次比 CK 提高了 72.31%、44.52%、4.00%、3.98%、3.97% 和 3.29%, 仅 D 和 E 处理与 CK 间的差异达显著水平, 其他处理与 CK 未达显著差异。

表 6 超声波处理对果蔗 CAT 活性的影响

Table 6 Effect of ultrasonic treatment on CAT enzyme activity in the growth period of chewing cane U/g

处理 Treatment	幼苗期 Seedling stage	分蘖期 Tillering stage	伸长初期 Early jointing stage
A	297.91±36.34ab	218.29±7.56a	210.54±32.48b
B	264.59±131.38ab	223.34±46.38a	210.61±19.45b
C	256.61±61.71ab	303.52±43.78a	210.56±30.25b
D	353.50±30.19a	256.87±15.67a	348.94±11.98a
E	219.49±13.93ab	229.10±25.17a	292.67±8.56a
F	178.20±27.61b	267.48±56.71a	209.18±20.28b
CK	147.90±31.53b	250.63±9.09a	202.51±28.14b

4) 超声波处理对果蔗叶片过氧化物酶(POD)活性的影响。从表 7 可看出,在幼苗期,叶片 POD

活性从高到低依次为 $E > F > B > CK > D > A > C$, E、F、B 依次比 CK 提高 17.24%、13.74% 和 8.57%, D、A、C 分别比 CK 降低 0.35%、7.61% 和 13.21%, 各处理与 CK 差异未达显著水平;在分蘖期,叶片 POD 活性从高到低依次为 $C > CK > F > E > B > D > A$, 处理 C 比 CK 提高 13.03%, F、E、B、D、A 分别比 CK 降低 20.06%、20.72%、22.00%、23.58% 和 28.18%, 各处理与 CK 处理差异未达显著水平;在伸长初期,叶片 POD 活性从高到低依次为 $F > A > D > E > C > CK > B$, F、A、D、E、C 依次比 CK 处理提高 31.83%、28.70%、26.07%、19.67% 和 16.42%, B 处理比 CK 降低 1.25%, 各处理与 CK 处理差异未达显著水平。

表 7 超声处理对果蔗 POD 活性的影响

Table 7 Effects of ultrasonic treatment on POD activity in the growth period of chewing cane U/g

处理 Treatment	幼苗期 Seedling stage	分蘖期 Tillering stage	伸长初期 Early jointing stage
A	10.56±1.80a	11.85±3.04a	10.27±1.88a
B	12.41±2.32a	12.87±0.54a	7.88±1.64a
C	9.92±3.21a	18.65±1.95a	9.29±1.44a
D	11.39±2.29a	12.61±4.02a	10.06±0.60a
E	13.40±2.80a	13.08±2.11a	9.55±1.50a
F	13.00±2.87a	13.19±4.17a	10.52±2.47a
CK	11.43±2.92a	16.50±8.45a	7.98±0.72a

3 讨论

超声波应用于农业是一个相对较早的研究领域,已有的研究表明适当剂量和处理时间的超声波处理能促进农作物种子萌发,提高种子萌芽率;促进作物根系生长和植株生长,提高作物产量^[21-23]。在水稻应用上,适当剂量的超声波处理水稻种子,其萌芽率、秧苗的有效分蘖率、成穗率、结实率、千粒重等均较对照有不同程度的提高,水稻增产 6.62%~10.18%^[13];在白术块根处理方面,超声波处理后的白术块茎产量增产 7.3%~19.6%^[24]。本研究中,与对照相比,超声波处理对果蔗萌芽率、分蘖率、生长速、株高、单茎质量及有效茎数均具有促进作用,果蔗蔗茎产量增产幅度为 10.28%~55.60%,果蔗蔗糖分(果蔗主要品质指标)变化幅度为-0.39%~0.79%(绝对值),与对照差异未达显著水平。本研究与上述研究结果基本一致,但超声波处理对果蔗蔗糖分的影响还有待进一步研究。

当植物受到不同程度逆境(干旱、病虫害侵染

等)胁迫后,植物叶片 SOD、POD、CAT 等抗氧化系统会受到不同程度影响或破坏,植株体内平衡被打破,超氧自由基、过氧化氢、氧化酚类、胺类等物质增加,由此产生一系列生理上的紊乱,影响植物生长^[14],但逆境胁迫后,植株抗氧化酶活性提高,有利于减缓逆境胁迫对植物的伤害^[25-26]。本研究中,在果蔗苗期、分蘖期、伸长期,SOD、POD、CAT 等 3 种主要抗氧化酶的活性较对照总体上表现为酶活性不同程度地提高,有利于减缓逆境胁迫对果蔗植株的伤害,提高果蔗植株的抗逆性。丙二醛(MDA)是植物膜脂过氧化的产物,其产生和积累会加剧植物细胞膜的损害,因此,MDA 含量能在一定程度上反映植物膜脂过氧化作用的强弱和植物细胞膜系统的完整程度^[27]。本研究中,在果蔗苗期、分蘖期、生长期,各超声波处理的果蔗叶片 MDA 含量总体上是低于对照的,有利于降低果蔗叶片细胞膜的损伤,提高超声波处理的果蔗植株对逆境胁迫的抵抗力。聂俊等^[14]研究表明超声波处理后水稻秧苗的抗氧化酶活性提高,主要防御酶活性也不同程度地提高,从而增强细胞内的氧清除能力,保护细胞膜的稳定性,提高植株的抗逆能力,这也佐证了本研究结果。

本研究中,F 处理(33 kHz、5 min)蔗茎产量较对照增产 55.60%(居参试处理首位),甘蔗蔗糖分提高 0.31 个百分点(居参试处理第 2 位);在果蔗苗期、分蘖期、伸长期,MDA 含量均较对照降低,SOD、POD、CAT 活性均较对照不同程度提高(除分蘖期 POD 活性略低于对照外)。F 处理是本研究筛选出的最佳处理,可明显提高黑皮果蔗产量、蔗糖分及抗逆性。该处理在黑皮果蔗生产上具有参考价值。

研究表明,超声波处理的频率过高或处理时间过长可抑制作物种子萌发,降低萌芽率,引起作物减产,甚至诱发基因突变,导致作物种性变异^[28]。今后将对不同基因型果蔗进行适宜超声波处理频率和处理时间筛选,促进超声波处理在果蔗生产上的应用。

参 考 文 献

- [1] 李杨瑞.现代甘蔗学[M].北京:中国农业出版社,2010.
- [2] 王继华,曹干,张剑亮,等.我国果蔗产业的现状与可持续发展[J].甘蔗糖业,2013(5):56-61.
- [3] CHEN R K, YUAN Z N. Sugarcane production and research in China[J]. International sugar journal, 2010, 112(1340): 452-457.
- [4] 朱鑫庆,马娅,卢彭封,等.超声波刺激植物生长仪器设计[J].中国农学通报,2013,29(35):187-192.
- [5] SILVA J, DOBRANSZKI J. Sonication and ultrasound: impact on plant growth and development[J]. Plant cell tissue and organ culture, 2014, 117(2): 131-143.
- [6] 袁经天,严锦璇,汪德锋,等.超声波处理对水稻种子萌发、产量及产量构成的影响[J].中国稻米,2014,20(2):53-55.
- [7] 刘贻尧,王伯初,赵虎成,等.植物对环境应力刺激的生物学效应[J].生物技术通讯,2000,11(3):219-222.
- [8] WU J, LIN L. Elicitor-like effects of low-energy ultrasound on plant (*Panax ginseng*) cells: induction of plant defense responses and secondary metabolite production[J]. Applied microbiology and biotechnology, 2002, 59(1): 51-57.
- [9] 杨相飞,马俊贵.植物声波助长技术在农业中的应用[J].农业工程,2015,5(3):135-137.
- [10] 黎国喜,严卓晟,闫涛,等.超声波刺激对水稻的种子萌发及其产量和品质的影响[J].中国农学通报,2010,26(7):108-111.
- [11] 王顺民,汪建飞.超声波处理对苦荞麦萌发、芽苗还原糖和总黄酮含量及抗氧化活性的影响[J].食品与机械,2017,33(1):161-166.
- [12] 张冬晨,刘海杰,刘瑞,等.超声波处理对荞麦种子营养物质累积以及抗氧化活性的影响[J].食品工业科技,2015,36(7):69-73.
- [13] 辛星光,肖立中,莫钊文,等.超声波处理对不同基因型水稻产量形成的影响[J].华北农学报,2014,29(4):198-204.
- [14] 聂俊,严卓晟,肖立中,等.超声波处理对水稻发芽特性及产量和品质的影响[J].广东农业科学,2013,40(1):13-15.
- [15] 杨红兵,丁为民,陈坤杰,等.超声技术在农业上的应用现状与前景[J].农机化研究,2004(1):202-204.
- [16] 沈万宽,陈仲华,杨湛端,等.新引进甘蔗品种比较试验[J].中国农学通报,2012,28(31):120-125.
- [17] 张志良,翟伟菁,李小方.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2009:123-227.
- [18] 石连旋,颜宏.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2013.
- [19] KONG W, LIU F, ZHANG C, et al. Fast detection of peroxidase (POD) activity in tomato leaves which infected with *Botrytis cinerea*, using hyperspectral imaging[J]. Spectrochimica acta part A molecular & biomolecular spectroscopy, 2014, 118(2): 498-502.
- [20] 陈建勋,王晓峰.植物生理学实验指导[M].2版.广州:华南理工大学出版社,2002:72-73.
- [21] 张思聪,孔雷蕾,唐湘如.超声波预处理对作物种子及幼苗的影响综述[J].安徽农业科学,2017,45(21):11-12.
- [22] NANTHARKRISHNAN G, XIA X, AMUTHA S, et al. Ultrasonic treatment stimulates multiple shoot regeneration and explant enlargement in recalcitrant squash cotyledon explants in vitro[J]. Plant cell reports, 2007, 26(3): 267-276.
- [23] 惠潇潇,曹辉,王云鹏.双频复合超声对绿豆种子生长发育的影响[J].应用声学,2017,36(5):395-400.

- [24] 郭孝武.超声波对白术块根生长和产量的影响[J].植物生理学报,1997(1):55-56.
- [25] LEE J, LIM K T, HONG J H, et al. Effects of ultrasound stimuli on acceleration of brown rice germination[J]. Journal of biosystems engineering, 2006, 31(6): 506-513.
- [26] 李健, 杜成忠, 王露蓉, 等. 甘蔗 $\Delta 1$ -吡咯啉-5-羧酸合成酶基因转化烟草的抗旱性分析[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(2): 34-42.
- [27] 张姝, 余斐, 王传贵, 等. 超声波对红豆杉悬浮细胞生长及紫杉醇释放的研究[J]. 生物技术, 2001, 11(2): 14-17.
- [28] 丁志山, 沃兴德. 超声波的生物学效用及其在转基因中的应用[J]. 生命科学, 1997(4): 187-189.

Effects of ultrasonic treatment on yield, quality and physiological characteristics of chewing cane

LI Hongbo¹ YAN Zhuosheng² DENG Quanqing¹ YAN Jingting¹
WU Jia¹ ZHONG Jianwen² SHEN Wankuan¹

1. College of Agriculture, South China Agricultural University/
Scientific Observing and Experimental Station of Crop Cultivation in South China,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510642, China;

2. Guangzhou Golden Rice Agricultural Science and Technology Co., Ltd., Guangzhou 510935, China

Abstract To study the effect of ultrasonic treatment on the yield, quality and physiological characteristics of chewing cane, and to provide scientific basis for the application of ultrasonic treatment in the production of chewing cane. Six treatments (A: 25 kHz, 1 min; B: 25 kHz, 3 min; C: 25 kHz, 5 min; D: 33 kHz, 1 min; E: 33 kHz, 3 min; F: 33 kHz, 5 min) were set up based on the two-factor experiment of different treatment frequencies and different treatment time. In addition, the untreated buds were used as control (CK). The results showed that, compared with the control, the ultrasonic treatment had a promoting effect on the budding rate, tillering rate, growth rate, plant height, single stem weight and effective stem number of hectare, and the cane yield increased by 10.28%-55.60%, and sucrose content increased by -0.39%-0.79% (absolute value). The activity of antioxidant enzymes, such as catalase, peroxidase and superoxide dismutase in leaves at the seedling stage, tillering stage and early jointing stage, could be improved, and the content of malondialdehyde in leaf plasma membrane could be reduced, and the resistance to chewing cane could be enhanced. Comprehensive analysis showed that the best treatment was 33 kHz and 5 min (cane yield increased by 55.60% and sucrose content increased by 0.31%). The research results have reference value for the application of ultrasonic treatment in chewing cane production.

Keywords chewing cane; ultrasonication; yield; quality; physiological characteristics

(责任编辑: 张志钰)