

不同营养液浓度与喷雾频率对雾培马铃薯生长及产量的影响

包 蕾, 王振龙, 金文录, 何文寿*

(宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750001)

摘 要: 试验以营养液浓度为主区, 喷雾频率为副区, 马铃薯块茎形成前后为前期、后期, 研究雾培条件下不同生育期不同营养液浓度与喷雾频率对马铃薯生长和产量的影响, 为马铃薯原原种生产实践提供参考。营养液浓度梯度分别设为 0.6 A:0.8 A (前期:后期)、0.8 A:A、A:1.2 A, 用 $C_{0.6:0.8}$ 、 $C_{0.8:1}$ 、 $C_{1:1.2}$ 表示, 喷雾频率为 40 s/10 min:40 s/20 min (喷雾/间隔, 前期:后期)、40 s/15 min:40 s/25 min、40 s/20 min、40 s/30 min, 用 $T_{10:20}$ 、 $T_{15:25}$ 、 $T_{20:30}$ 表示, 并采用主成分聚类分析对各处理进行综合排序与评价。结果表明: 定植 30 d, 营养液浓度、喷雾频率及二者交互均可极显著增加马铃薯各部位干重且均为处理 $C_{0.8:1}T_{20:30}$ 最大; 定植 60 d, 各处理间生物量差异显著性较大且处理 $C_{1:1.2}T_{20:30}$ 全株干重最大。各处理 $G \leq 3$ g 小薯在薯类分级中所占比例均最大, 处理间 $3 \text{ g} < G \leq 5$ g 小薯差异不大, 但其他等级小薯差异较大, 处理 $C_{1:1.2}T_{15:25}$ 在单株薯数、单株薯重和折合产量上均最大。通过主成分聚类分析, 处理 $C_{1:1.2}T_{15:25}$ 得分最高, 且各处理对雾培马铃薯生长的影响可聚为五类, 处理 $C_{0.8:1}T_{20:30}$ 与 $C_{1:1.2}T_{15:25}$ 聚为一类, 综合评价为一等; 处理 $C_{0.6:0.8}T_{10:20}$ 、 $C_{1:1.2}T_{20:30}$ 和 $C_{0.6:0.8}T_{15:25}$ 聚为一类, 综合评价为二等; 处理 $C_{0.8:1}T_{15:25}$ 单独聚为一类, 综合评价为三等; 处理 $C_{0.6:0.8}T_{20:30}$ 和 $C_{0.8:1}T_{10:20}$ 聚为一类, 综合评价为四等; 处理 $C_{1:1.2}T_{10:20}$ 单独聚为一类, 综合评价为五等。因此, 适当加大营养液浓度, 延长喷雾间隔时间有利于雾培马铃薯生长及产量增加。

关键词: 雾培; 马铃薯; 营养液浓度; 喷雾频率; 生长

近年来, 为防止马铃薯退化, 实现其优质高产目的, 马铃薯脱毒原原种的生产愈加重要^[1-2], 而雾培法作为主要生产技术因其在原原种产量方面具有极大优势而备受关注^[3-5]。雾培法生产马铃薯的主要养分供给来自营养液^[6], 对此, 目前大多研究是在 MS 营养液配方基础上改变 N、P、K 比例或调整整体浓度进行探讨^[7-9]。但最近研究发现此类型配方离子浓度较高, 氮含量过大且含有不利于马铃薯块茎生长的 Cl^- ^[10]。相反, Oraby 等^[11]采用霍格兰营养液配方取得单株结薯数超过 70 个的理想效果。乔建磊^[12]在霍格兰营养液基础上进行修改, 得出氮磷钾比例为 1:0.28:1.3 时雾培马铃薯结薯性能最好, 但针对霍格兰营养液浓度的研究很少。

现阶段, 关于喷雾频率的研究也较少且各研究所选取频率值差异较大、不集中^[13]。Jowkar 等^[14]以两种喷雾频率 3 min/15 min 和 3 min/30 min (喷雾时间/间隔时间) 对玫瑰进行雾培研究, 发现 3 min/15 min 的喷雾频率更有利于玫瑰生长。Fanourakis 等^[15]研究得出: 在 3 种喷雾频率 3 min/2 h、12 min/1 h 和 1 min/6 h (喷雾时间/间隔时间) 中, 3 min/2 h 有利于切菊花生长, 低频 (1 min/6 h) 有利于植株地上部干物质质量积累, 而高频 (12 min/1 h) 影响不显著。

在雾培马铃薯方面单独针对喷雾频率的研究更少且所采用喷雾频率复杂多样, 柳巧霞等^[16]研究认为: 在温度增高的条件下, 供液时间越长, 马铃薯植株生长越快。邱孟柯等^[17]在雾培马铃薯全生育期将喷雾频率设为间隔 3 min 喷雾 20 s。梁杰等^[18]在不同马铃薯生长期采用不同喷雾频率, 幼苗期间隔 400 s 喷雾 30 s, 块茎成长期间隔 200 s 喷雾 30 s。李标等^[19]则根据不同光照条件进行设置, 移栽最初 7 d 白天喷雾 30 s 间隔 1 h, 晚上喷雾 30 s 间隔 2 h, 7 d 后白天喷雾 30 s 间隔 1.5 h, 晚上喷雾 30 s 间隔 3 h。

有研究认为: 根据马铃薯不同生育期来调节营养液浓度与喷雾频率, 不仅可以促进植株生长, 还可节约营养液及能源^[13], 对规范指导雾培马铃薯

收稿日期: 2018-08-24; 录用日期: 2018-10-04

基金项目: 自治区重点研发项目《马铃薯优质高效生产技术集成示范与科技扶贫》, 2018BF02002; 自治区中央引导地方发展专项项目《宁夏中部干旱带高效节水特色农业综合生产技术集成与应用示范》, YDZX20176400004563。

作者简介: 包蕾 (1995-), 女, 宁夏银川人, 在读硕士, 专业方向为植物营养与调控。E-mail: 1270459855@qq.com。

通讯作者: 何文寿, E-mail: hews@nxu.edu.cn。

生产具有一定的实践意义。因此,本研究在此方面进行了初步研究,并以霍格兰营养液为基础,针对不同生育期不同营养液浓度与喷雾频率对雾培马铃薯生长及产量的影响进行讨论,拟初步探索雾培马铃薯适宜的营养液浓度与喷雾频率,为进一步的深入研究和科学指导马铃薯原种生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验环境概况

本试验于2018年4月至6月在宁夏大学玻璃温室培养室内进行,试验期间,温室白天温度 $18 \sim 30^{\circ}\text{C}$,夜间 $10 \sim 20^{\circ}\text{C}$;湿度 $70\% \sim 80\%$;生长期光照主要来自日光照射,每天光照时间大致为 $8 \sim 10\text{ h}$ 。

1.2 试验装置

采用雾培控制箱进行试验,主要由营养液桶、栽培箱、供液泵、时间控制配电箱、PVC管道、雾化喷头等部件组成,可实现喷雾自动控制及循环式供液。喷雾频率通过智能计测器控制。栽培箱规格(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)为 $230\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 30\text{ cm}$,幼苗在聚乙烯硬

泡沫板上定植,马铃薯植株种植密度(行距 $\times$ 株距)为 $15\text{ cm} \times 10\text{ cm}$,每小区定植脱毒苗42株。

1.3 试验设计

本试验以“费乌瑞它”马铃薯脱毒苗为试验材料,该品种为早熟品种,生育期为 $80 \sim 90\text{ d}$ 左右,生长势旺盛,脱毒试管苗先于统一水培条件下培育 20 d ,营养液以改良霍格兰营养液A为基础^[20](表1),前7d采用A/3营养液,之后采用3/5 A营养液。待株高达到 $8 \sim 10\text{ cm}$,根势良好,以裂区试验设计开始雾培试验。其中营养液浓度梯度为主区,喷雾频率为副区,均分别设3个调节梯度,共9个处理,3次重复。以马铃薯块茎形成前后分为前期与后期(前期与后期大致各为 30 d),详细试验安排见表2。在脱毒苗定植前3d,由于幼苗处于缓苗状态,统一喷0.6 A营养液,喷雾频率设置为每间隔 10 min 喷雾 40 s ,之后按照试验设计运行。微量元素营养液统一采用改良阿农微量元素营养液配方^[21];微雾喷头流量控制在 0.2 L/min 左右,管道压力大约为 0.2 Pa ,营养液循环利用,每周更换一次,每天调节营养液pH值至 $6.0 \sim 7.0$ 。

表1 主要元素营养液配方

(mg/L)

盐类	0.6 A	0.8 A	A	1.2 A
NH_4NO_3	168	224	280	336
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	660	880	1 100	1 320
KNO_3	549	732	915	1 098
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	294	392	490	588
KH_2PO_4	192	256	320	384

表2 不同处理裂区试验排列

处理	主区	副区
	营养液浓度(前期:后期)	喷雾频率(喷雾/间隔,前期:后期)
$\text{C}_{0.6:0.8}\text{T}_{10:20}$	$\text{C}_{0.6:0.8}(0.6\text{ A}:0.8\text{ A})$	$\text{T}_{10:20}(40\text{ s}/10\text{ min}:40\text{ s}/20\text{ min})$
$\text{C}_{0.6:0.8}\text{T}_{15:25}$		$\text{T}_{15:25}(40\text{ s}/15\text{ min}:40\text{ s}/25\text{ min})$
$\text{C}_{0.6:0.8}\text{T}_{20:30}$		$\text{T}_{20:30}(40\text{ s}/20\text{ min}:40\text{ s}/30\text{ min})$
$\text{C}_{0.8:1}\text{T}_{10:20}$	$\text{C}_{0.8:1}(0.8\text{ A}:1\text{ A})$	$\text{T}_{10:20}$
$\text{C}_{0.8:1}\text{T}_{15:25}$		$\text{T}_{15:25}$
$\text{C}_{0.8:1}\text{T}_{20:30}$		$\text{T}_{20:30}$
$\text{C}_{1:1.2}\text{T}_{10:20}$	$\text{C}_{1:1.2}(1\text{ A}:1.2\text{ A})$	$\text{T}_{10:20}$
$\text{C}_{1:1.2}\text{T}_{15:25}$		$\text{T}_{15:25}$
$\text{C}_{1:1.2}\text{T}_{20:30}$		$\text{T}_{20:30}$

1.4 数据测定与分析

马铃薯于雾培架上定植第3 d开始,每隔5 d选取10株植株,测定与马铃薯生长发育密切相关的株高、茎粗、匍匐茎数等生长指标。株高测量范围从茎基部与栽培板交界处到植株最顶部,茎粗用游标卡尺测量植株茎基部与栽培板交界处直径,根长测量范围从茎基部与栽培板交界处到根末端,目测统计所有匍匐茎数,具体参照马铃薯栽培生理^[22]。每隔10 d选取植株3株,采用托普智能叶面积仪测定叶面积(从上到下依次选取大、中、小3片叶进行测量后取平均值)^[1];采用常规排水法测定根系体积^[1];植株生物量为干物质量(分别测量根、茎、叶、果实及总干重),将鲜样在105℃杀青30 min,然后在80℃下烘干至恒重^[23]。收获期每个处理选取10株马铃薯统计产量并计算平均值(分别记录 $G \leq 3\text{ g}$ 、 $3\text{ g} < G \leq 5\text{ g}$ 、 $5\text{ g} < G \leq 10\text{ g}$ 、 $G > 10\text{ g}$ 马铃薯个数及单株总薯数与总薯重并折算其产量);试验数据以Excel 2010软件整理,采用SPSS 21.0软件进行统计分析,用LSD法进行显著性检验,显著性水平 $P < 0.05$ ($n=5$),结合权重,隶属函数法进行相关值评价。

2 结果与分析

2.1 营养液浓度梯度与喷雾频率对雾培马铃薯生物量的影响

从表3可以看出,定植30 d时,喷雾频率、营

养液浓度及两因素交互均可极显著影响($P < 0.001$)根干重、叶干重、茎干重和全株干重。其中,各处理间根干重差异显著,处理 $C_{0.8:1}T_{20:30}$ 最高,可达2.49 g/株,比最低处理 $C_{0.6:0.8}T_{20:30}$ (0.67 g/株)高出271.64%。但各处理间叶干重差异显著性不明显。此外,叶干重在各指标间所占比例最大;相比前期末,定植60 d时,两因素对马铃薯的生物量影响的差异显著性不大,但各处理间的差异显著性均较大,喷雾频率对全株干重影响不显著($P > 0.05$),但可极显著影响叶干重($P < 0.001$),营养液浓度对叶干重、茎干重和果实干重均有极显著影响,两因素交互作用除了可显著增加根干重外($0.001 < P < 0.01$),对其他指标的影响均可达到极显著水平。处理 $C_{1:1.2}T_{20:30}$ 在叶干重、茎干重和全株干重上均表现为最大,分别为10.08、4.51和25.34 g/株,比最低处理分别高出216.98%、58.80%和96.28%。处理 $C_{0.6:0.8}T_{10:20}$ 根干重最大,为4.93 g/株;处理 $C_{1:1.2}T_{15:25}$ 果实干重最大,为9.95 g/株。此外,且从各指标变化来看,后期末叶干重与果实干重所占比例最大。综合来看,处理 $C_{1:1.2}T_{20:30}$ 在前期末各部位生物量不大,但后期增长幅度迅速,在后期末表现为全株生物量最大;而处理 $C_{1:1.2}T_{10:20}$ 在整个生育期各部位生物量均较小。

表3 不同营养条件下马铃薯生物量 (g/株)

喷雾 频率	营养液浓度 梯度	定植 30 d				定植 60 d				
		根干重	叶干重	茎干重	全株干重	根干重	叶干重	茎干重	果实干重	全株干重
T _{10:20}	C _{0.6:0.8}	0.83de	1.50b	0.41c	2.73c	4.93a	7.91b	3.13cd	7.28cd	23.25ab
	C _{0.8:1}	0.98cd	1.65b	0.47c	3.10bc	2.58cd	4.98cd	2.91d	8.18bcd	18.65cd
	C _{1:1.2}	0.69e	1.30b	0.40c	2.39c	1.76d	3.18e	2.84d	5.13e	12.91e
T _{15:25}	C _{0.6:0.8}	0.87cde	1.57b	0.50c	2.93bc	4.03ab	7.10b	4.50a	7.61bcd	23.24ab
	C _{0.8:1}	1.02cd	1.63b	0.46c	3.11bc	2.68cd	5.29cd	3.13cd	8.55abc	19.65bcd
	C _{1:1.2}	1.26b	1.90b	0.70b	3.86b	3.74abc	7.50b	3.96ab	9.95a	25.15a
T _{20:30}	C _{0.6:0.8}	0.67e	1.34b	0.53bc	2.54c	2.32d	4.24d	2.49d	6.80d	15.85cd
	C _{0.8:1}	2.49a	3.84a	1.39a	7.72a	2.90bcd	5.36c	3.61bc	8.98ab	20.85bc
	C _{1:1.2}	1.07bc	1.71b	0.55bc	3.34bc	2.07d	10.08a	4.51a	8.68abc	25.34a
F 值	T	70.81***	20.31***	22.26***	34.58***	8.42**	20.38***	5.40*	6.96**	0.93ns
	C	47.00***	15.56***	38.81***	29.45***	5.40*	13.52***	13.90***	13.83***	8.38**
	T × C	52.63***	17.30***	29.37***	30.17***	6.58**	63.22***	14.16***	10.05***	15.91***

注: C 表示营养液浓度梯度, T 表示喷雾频率, T × C 表示喷雾频率和营养液浓度梯度交互作用, 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平; ns, *, **, *** 分别表示营养液浓度梯度、喷雾频率和二者交互作用对相关指标的影响不显著, 5%, 1% 和 0.1% 水平显著^[24]。表 4 同。

2.2 营养液浓度梯度与喷雾频率对马铃薯产量的影响

从表4可以看出,喷雾频率对各结薯性能指标的影响较营养液浓度与两因素交互作用显著。其中,喷雾频率对 $3\text{ g}<G\leq 5\text{ g}$ 小薯数影响不显著($P>0.05$),但可极显著影响 $G>10\text{ g}$ 小薯数($P<0.001$),对其他指标均有显著影响($0.001<P<0.01$);营养液浓度可显著增加单株总薯重、 $5\text{ g}<G\leq 10\text{ g}$ 小薯数和折合产量,对其他指标影响均不显著;两因素交互作用可显著影响单株总薯数与 $G\leq 3\text{ g}$ 小薯数,对其他指标影响均不显著。就各处理间的变化而言, $3\text{ g}<G\leq 5\text{ g}$ 小薯数的变化差异较小,处理 $C_{1:1.2}T_{20:30}$ 最

高,为686个;处理 $C_{0.8:1}T_{20:30}$ 匍匐茎数与 $G\leq 3\text{ g}$ 的小薯数均最大,分别为139.00条/株与51.14个,比最低高出40.40%和155.7%;处理 $C_{1:1.2}T_{15:25}$ 总薯数、总薯重、 $G>10\text{ g}$ 小薯数和折合产量均最高,分别为69.43粒/株、172.34 g/株、4.14个和9306.28 g/m²,比最低处理分别高出82.71%、110.97%、1327.58%和110.96%;处理 $C_{0.8:1}T_{15:25}$ 在 $5\text{ g}<G\leq 10\text{ g}$ 小薯数最多,为10.71个。而处理 $C_{0.6:0.8}T_{20:30}$ 总薯重、 $5\text{ g}<G\leq 10\text{ g}$ 、 $G>10\text{ g}$ 和折合产量均最低,处理 $C_{0.6:0.8}T_{10:20}$ 匍匐茎数与 $3\text{ g}<G\leq 5\text{ g}$ 最低,处理 $C_{1:1.2}T_{10:20}$ 总薯重和 $G\leq 3\text{ g}$ 最低。

表4 不同营养条件下马铃薯产量

喷雾 频率	营养液浓度 梯度	匍匐茎 (条/株)	总薯数 (粒/株)	总薯重 (g/株)	$G\leq 3\text{ g}$ (个)	$3\text{ g}<G\leq 5\text{ g}$ (个)	$5\text{ g}<G\leq 10\text{ g}$ (个)	$G>10\text{ g}$ (个)	折合产量 (g/m ²)
$T_{10:20}$	$C_{0.6:0.8}$	99.00c	38.43c	95.72c	27.86cd	3.14a	5.29c	2.14abcd	5168.80c
	$C_{0.8:1}$	106.14abc	48.71bc	120.43bc	34.57bcd	5.57a	5.14c	3.43ab	6502.99bc
	$C_{1:1.2}$	103.86bc	38.00c	130.37abc	20.00d	6.57a	9.71ab	1.71bcd	7039.98abc
$T_{15:25}$	$C_{0.6:0.8}$	121.86abc	54.43abc	125.58abc	39.71abc	4.57a	7.00abc	3.14abc	6781.40abc
	$C_{0.8:1}$	128.28abc	45.71bc	152.21ab	25.71cd	6.14a	10.71a	3.14abc	8219.42ab
	$C_{1:1.2}$	138.00ab	69.43a	172.34a	49.00ab	6.71a	9.57ab	4.14a	9306.28a
$T_{20:30}$	$C_{0.6:0.8}$	126.43abc	48.71bc	81.69c	38.00abc	6.29a	4.14c	0.29d	4411.41c
	$C_{0.8:1}$	139.00a	62.71ab	124.26abc	51.14a	5.57a	4.86c	1.14cd	6709.96abc
	$C_{1:1.2}$	127.86abc	56.00abc	115.89bc	41.00abc	6.86a	6.43bc	1.71bcd	6257.91bc
F 值	T	6.49**	6.11**	6.24**	7.67**	0.61ns	7.12**	10.24***	6.24**
	C	0.58ns	1.23ns	5.09**	0.12ns	1.92ns	4.32*	1.1ns	5.09**
	T×C	0.26ns	2.74*	0.24ns	4.57**	0.49ns	1.36ns	1.34ns	0.24ns

2.3 雾培马铃薯生物量与产量的相关性分析

对雾培马铃薯定植第60 d部分生长指标及产量进行相关性分析。从表5可以看出,单株总薯数与果实干重之间为极显著正相关,相关系数为0.811。全株干重与叶干重之间为极显著正相关关系,相关系数为0.923;与果实干重为显著正相关关系,相关系数为0.760。其次,茎干重与叶干重之间呈显著正相关,相关系数为0.776;但匍匐茎数与根干重及叶干重之间均呈负相关关系。

2.4 雾培马铃薯各生长指标的主成分分析

影响雾培马铃薯生长的诸因素间存在一定交互关系,致使反映马铃薯生物量与产量的许多指标信息发生交织和重叠,为使影响因素更加清晰,本研究针对收获时(60 d)雾培马铃薯11项指标以主成

分分析法进行降维,根据累积贡献率 $\geq 85\%$ 原则,筛选出4个主成分。如表6所示,主成分1、2、3、4贡献率分别为46.70%、21.01%、13.62%和9.20%,累积贡献率可达90.53%,因此,4个主成分可综合衡量11项指标的所有信息。第一主成分上茎干重、果实干重、全株干重、根长、根体积和叶面积均有较大正向量值,为其主要指标,特征向量值分别为0.806、0.831、0.960、0.778、0.726和0.763,因此第1主成分主要为收获时马铃薯生物量及部分生长指标的综合体现。第2主成分上匍匐茎数有较大正向量值,为0.762,其次为株高。第3主成分上株高、根干重和根长有较大正向量值,分别为0.529、0.443和0.361。第4主成分与茎粗关系密切,向量值为0.687。

表 5 马铃薯生物量与产量相关性

	根干重	茎干重	叶干重	果实干重	全株干重	匍匐茎数	总薯数
根干重	1						
茎干重	0.261	1					
叶干重	0.429	0.776*	1				
果实干重	0.263	0.524	0.543	1			
全株干重	0.592	0.801**	0.923**	0.760*	1		
匍匐茎数	-0.414	0.242	-0.023	0.526	0.105	1	
总薯数	0.086	0.606	0.372	0.811**	0.582	0.581	1

注：* 代表相关显著（ $P<0.05$ ），** 代表相关极显著（ $P<0.01$ ）。

表 6 各指标的主成分分析

指标	主成分			
	1	2	3	4
X1：根干重	0.641	-0.487	0.443	0.278
X2：叶干重	0.705	-0.029	-0.548	0.060
X3：茎干重	0.806	-0.303	-0.388	0.074
X4：果实干重	0.831	0.480	-0.078	-0.004
X5：全株干重	0.960	-0.117	-0.209	0.114
X6：匍匐茎数	0.103	0.762	-0.492	0.107
X7：株高	0.390	0.584	0.529	-0.266
X8：茎粗	0.302	0.548	0.283	0.687
X9：根长	0.778	0.418	0.361	-0.264
X10：根体积	0.726	-0.571	0.261	0.139
X11：叶面积	0.763	-0.120	-0.038	-0.519
特征值	5.14	2.31	1.50	1.01
贡献率	46.70	21.01	13.62	9.20
累积贡献率	46.70	67.71	81.33	90.53

求出 4 个主成分的综合得分值，并对其进行排序，综合评价收获时（60 d）各处理间雾培马铃薯的生长及产量。由表 7 可以看出处理 $C_{1:1.2}T_{15:25}$ 得分最高，为 0.71，依次是处理 $C_{1:1.2}T_{20:30}$ 、处理 $C_{0.6:0.8}T_{15:25}$ 和处理 $C_{0.6:0.8}T_{10:20}$ 。而处理 $C_{1:1.2}T_{10:20}$ 得分最低，为 0.14。再以最短距离法计算各处理间的欧氏距离，对 9 个处理进行系统聚类。如图 1 所示，可将 9 个处理聚为 5 类，结合表 7 所得的综合排名，可将 5 类处理进行排序：处理 $C_{0.8:1}T_{20:30}$ 与 $C_{1:1.2}T_{15:25}$ 聚为一类，综合评价为一等；处理 $C_{0.6:0.8}T_{10:20}$ 、 $C_{1:1.2}T_{20:30}$ 和 $C_{0.6:0.8}T_{15:25}$ 聚为一类，综合评价为二等；处理 $C_{0.8:1}T_{15:25}$ 单独聚为一类，综合评价为三等；处理 $C_{0.6:0.8}T_{20:30}$ 和 $C_{0.8:1}T_{10:20}$ 聚为一类，综合评价为四等；处理 $C_{1:1.2}T_{10:20}$ 单独聚为一类，综合评价为五等。

3 讨论

有研究表明马铃薯块茎干物质的 90% 以上都来自光合产物，而叶片是进行光合作用的主要场所，因此，其生长状况好坏直接影响马铃薯产量高低^[1]。在本研究结果中，雾培马铃薯生长前期末叶片干物质累积量所占比例最大，后期末叶片与果实干物质累积量所占比例最大，两研究结果有相似之处。营养液浓度过低，其中矿质元素含量不足，会导致养分亏缺而影响植株正常生长；营养液浓度过高，离子会对植株产生胁迫，植株也不能正常生长^[7]。丁凡^[8]研究表明，营养液浓度梯度可极显著影响雾培马铃薯植株干重，表现为 MX 与 0.8MX 浓度下，植株干物质累积量均大于 0.6MX。本研究得出，前期末处理 $C_{0.8:1}T_{20:30}$ 表现较优，后期末处理

表 7 各指标对马铃薯影响的综合评价

处理	主成分				综合得分	排名
	1	2	3	4		
C _{0.6:0.8} T _{10:20}	0.17	-0.66	2.22	-0.29	0.56	4
C _{0.6:0.8} T _{15:25}	0.56	-0.02	0.80	-0.38	0.59	3
C _{0.6:0.8} T _{20:30}	-1.70	0.91	0.23	-0.21	0.30	8
C _{0.8:1} T _{10:20}	-0.41	-0.48	-0.26	0.65	0.39	7
C _{0.8:1} T _{15:25}	-0.04	1.15	-0.48	-1.34	0.50	6
C _{0.8:1} T _{20:30}	0.01	0.86	-0.67	0.04	0.52	5
C _{1:1.2} T _{10:20}	-1.04	-1.91	-0.94	0.11	0.14	9
C _{1:1.2} T _{15:25}	0.72	0.71	-0.02	2.21	0.71	1
C _{1:1.2} T _{20:30}	1.73	-0.56	-0.88	-0.79	0.64	2

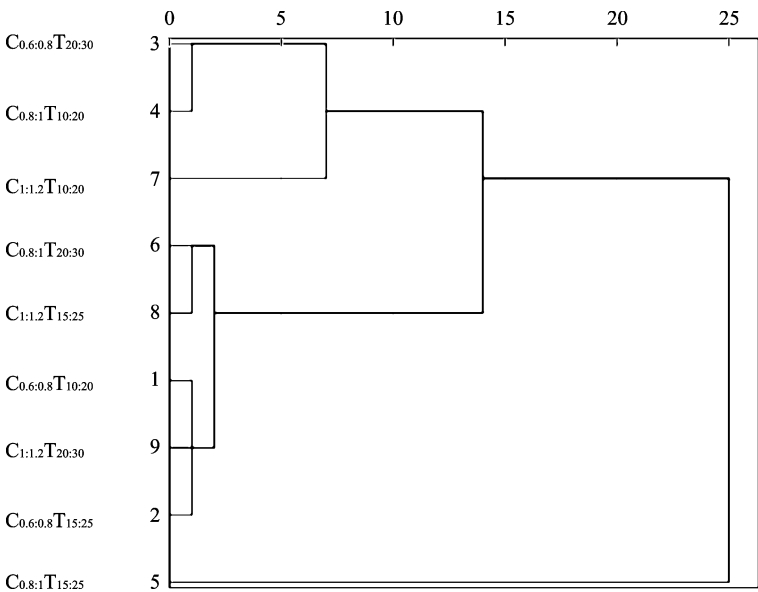


图 1 各处理聚类分析

C_{1:1.2}T_{15:25} 与处理 C_{1:1.2}T_{20:30} 表现较优，即中高浓度条件有利于马铃薯干物质累积且营养液浓度与喷雾频率对其影响显著，这与丁凡^[8]研究有相似之处。但王素梅等^[25]研究认为低电导率（1 500 μS/cm）和高电导率（3 000 μS/cm）营养液都不利于植株生长，与本研究结果不同之处可能与所用营养液配方不同有关。其次，本研究结果表明，雾培马铃薯前期喷雾频率以“间隔 20 min 喷雾 40 s”有利于植株生长，后期以“间隔 25 min 喷雾 40 s”有利于原原种产量增加。

匍匐茎是马铃薯地下茎节上叶芽水平生长的侧枝，是块茎形成的前提，其数量与马铃薯产量密切

相关^[26]。唐铭霞等^[27]研究认为在马铃薯块茎形成期，全硝态氮营养可显著增加一级匍匐茎和二级匍匐茎数量。王季春^[28]研究得出 NO₃⁻-N/NH₄⁺-N 比值较高的营养液有较强的匍匐茎促进能力。匍匐茎生长与营养元素成分关系密切，以上研究结果均表明不同氮素均对匍匐茎生长有一定影响，本研究在不同营养液浓度与喷雾频率因素下进行探讨，得出喷雾频率可显著增加匍匐茎数量，且中高浓度营养液条件下增幅较大，这可能与两因素造成处理间营养成分差异有关。有研究表明，单株薯数与薯重是反映马铃薯原原种产量很好的指标^[29]。丁凡^[8]研究认为中高浓度下马铃薯块茎数与块茎重极显著高

于低浓度,这与本研究结果相似。而喷雾频率较营养液浓度对马铃薯单株薯数与单株薯重影响更显著,且整体来看喷雾间隔时间较长的喷雾频率更有利于结薯。柳巧霞等^[16]研究得出:随着温度升高,喷雾时间适中的处理,马铃薯的单株薯数与薯重均最高,两研究结果有相似之处。马铃薯为盐中度敏感作物,盐胁迫会抑制其生长,进而影响产量^[30]。本研究结果可能因为较长喷雾间隔时间正好降低根系周围盐浓度,进而影响马铃薯根系渗透调节、叶片光合作用且增加植株体内耐盐性酶活性,反倒有利于马铃薯生长与产量增加。喷雾频率作用机理微妙复杂,目前在此方面研究也较少,具体作用机理与更精确的喷雾频率还需进一步研究得出。

主成分聚类分析是数学上用来降维的一种方法,可很好地处理变量间的多重相关性,使彼此之间具有相互独立性^[31],能够客观评价不同处理对雾培马铃薯生长的影响,近年来也在众多农业试验中被应用。本研究通过主成分与聚类分析得出,处理 $C_{1:1.2}T_{15:25}$ 与处理 $C_{1:1.2}T_{20:30}$ 表现最好,其次为处理 $C_{0.6:0.8}T_{15:25}$ 和处理 $C_{0.6:0.8}T_{10:20}$,处理 $C_{1:1.2}T_{10:20}$ 最次。处理 $C_{1:1.2}T_{10:20}$ 营养液浓度较高,但在生物量与结薯性能上均表现不好,可能与本试验区光照不均有关,由于试验温室周围建筑物遮挡,导致该处理日光照时间最短。整体来看,在此试验研究条件下,高浓度与低浓度有利于雾培马铃薯生长,这与王素梅^[7]研究得出的营养液浓度过高与过低都不利于马铃薯生长的结果不一致,这可能与两试验所用的营养液配方与试验因素不同有关,本试验将马铃薯整个生育期设为前后两时期,后期所提供营养液浓度相对高于前期,正好满足结薯期所需较多的营养成分,也会在一定程度上增加产量。综合来看,喷雾间隔时间较短并非有利于马铃薯的生长,相反,喷雾间隔时间较长表现较优。有研究表明根际微生物活动与营养元素有关^[32-33],而本研究得出,不同的喷雾频率影响下马铃薯生长与产量均有差异,这很大程度上可能与不同喷雾频率导致营养元素成分差异有关。本试验只在这方面进行了初步探索,具体作用机理还需深入探讨。

4 结论

综上所述,定植 30 d, 0.8A 营养液浓度下,喷雾间隔 20 min 有利于前期雾培马铃薯植株生长;定植 60 d, A 营养液浓度下,喷雾间隔 25 min 有利于

后期雾培马铃薯生长及产量增加。处理 $C_{1:1.2}T_{15:25}$ 在马铃薯产量及薯类分级上表现最佳。此外,主成分聚类分析结果表明,中高浓度且喷雾间隔时间较长有利于雾培马铃薯的生长及产量增加。

参考文献:

- [1] 李标. 源库调控对雾培马铃薯结薯性能的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2008.
- [2] Otazu V. Quality seed potato production using aeponics [M] // A potato production manual. Lima Peru: International Potato Center, 2008. 35.
- [3] 白金达. 马铃薯脱毒苗基质栽培与雾化栽培繁育技术研究 [D]. 成都: 四川农业大学, 2010.
- [4] 杨元军, 孙慧生, 王培伦, 等. 马铃薯脱毒小薯雾培结薯特点及增产效果 [J]. 园艺学报, 2002, (4): 333-336.
- [5] 杨元军, 孙慧生, 王培伦, 等. 雾培与基质栽培马铃薯脱毒小薯继代产量比较 [J]. 山东农业科学, 2002, (1): 29-30.
- [6] 高龙梅, 杨小丽, 胡振兴, 等. 脱毒马铃薯雾化栽培研究进展 [J]. 现代农业科技, 2015, (22): 113-114.
- [7] 王素梅. 雾培脱毒马铃薯适宜营养液配方和浓度的研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2004.
- [8] 丁凡. 不同营养条件对雾培马铃薯生长发育的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [9] 李继曼. 气雾培马铃薯种薯生长不同阶段营养液的配制研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [10] 张晓勇. 离子浓度、光质和激素对水培马铃薯苗薯繁殖及光合性能的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [11] Oraby H, Lachance A, Desjardins Y. A low nutrient solution temperature and the application of stress treatments increase potato mini-tubers production in an aeroponic system [J]. American Journal of Potato Research, 2015, 92 (3): 387-397.
- [12] 乔建磊. 马铃薯雾培营养调控机理研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [13] 张倩倩. 气雾栽培式家庭植物工厂的设计及喷雾频率的优化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [14] Jowkar A, Kafi M, Babalar M, et al. Effects of ammonium ratio and nutrient delivery interval on roses growing in aeroponics [J]. Acta Horticulturae, 2010, 870: 73-80.
- [15] Fanourakis D, Heuvelink E, Verkerke W, et al. Possibilities for soilless cultivation in cut Chrysanthemum: effect of irrigation frequencies and spacing schedules [J]. Acta Horticulturae, 2011, 893: 915-923.
- [16] 柳巧霞, 贺晓霞. 不同环境条件对雾培马铃薯生长及微型薯产量的影响 [J]. 农业科技与信息, 2018, (4): 32-33.
- [17] 邱孟柯, 回振龙, 黄晓鹏, 等. 黄腐酸对雾培马铃薯幼苗抗旱性的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31 (3): 155-161.
- [18] 梁杰, 李功义. 雾培法生产马铃薯核心小薯技术 [J]. 农村实用科技信息, 2010, (8): 17.
- [19] 李标, 王季春, 黄振霖, 等. 叶片数量调控对雾培马铃薯生长发育的影响 [J]. 中国马铃薯, 2008, (2): 77-80.

- [20] 毛达如. 植物营养研究方法 [M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1994. 50-80.
- [21] 山崎肯哉 (日). 营养液栽培大全 [M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1989. 36-54.
- [22] 门福义, 刘梦芸. 马铃薯栽培生理 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [23] 侯贤清, 李荣, 何文寿, 等. 保水剂施用量对土壤水分利用及马铃薯生长的影响 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2015, 41 (5): 558-566.
- [24] 王亮, 林涛, 严昌荣, 等. 不同残膜量和灌溉定额对棉花养分和水分利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (1): 122-133.
- [25] 王素梅, 王培伦, 王秀峰, 等. 营养液成分对雾培脱毒微型马铃薯产量的影响 [J]. 山东农业科学, 2003, (4): 32-34.
- [26] 张明宇. 气雾栽培马铃薯微型原薯营养液优化配制 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [27] 唐铭霞, 王克秀, 胡建军, 等. 不同氮素形态比对雾培马铃薯生长和原原种产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2018, (3): 20-25.
- [28] 王季春. 脱毒马铃薯雾培结薯的优势机理研究 [D]. 重庆: 西南农业大学, 2005.
- [29] 刘伟, 王季春, 高旭, 等. 匍匐茎调控对雾培马铃薯生长的影响 [J]. 中国马铃薯, 2010, 24 (6): 341-344.
- [30] 李青, 秦玉芝, 胡新喜, 等. 马铃薯耐盐性研究进展 [J]. 园艺学报, 2017, 44 (12): 2408-2424.
- [31] 吴海燕, 金荣德, 范作伟, 等. 基于主成分和聚类分析的黑土肥力质量评价 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (2): 325-334.
- [32] 肖新, 李英峰, 韩贻涛, 等. 尿素施用量对道地药材滁菊土壤微生物活性的影响 [J]. 水土保持学报, 2011, 25 (5): 99-102.
- [33] 杨瑞吉, 马海灵, 杨祁峰, 等. 种植密度与施氮量对麦茬复种饲料油菜土壤微生物活性的影响 [J]. 应用生态学报, 2007, (1): 113-117.

Effects of different nutrition solution concentration and spray frequency on growth and yield of aeroponic potatoes

BAO Lei, WANG Zhen-long, JIN Wen-lu, HE Wen-shou* (College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan Ningxia 750001)

Abstract: The split-spot design was applied in this experiment, set the nutrient solution concentration was set as the main area, and the spray frequency as the sub-area. Pre-stage and late-stage were set up according to the formation of potato tubers. The effect of different nutrient concentration and spray frequency on potato growth and yield under different growth stages was studied by this experiment, which could provide a reference to practical production of original potato. The nutrient solution concentration gradient was set to 0.6 A:0.8 A (pre-stage: late-stage), 0.8 A:A, A:1.2 A, with $C_{0.6:0.8}$, $C_{0.8:1}$, $C_{1:1.2}$, the spray frequency was set to 40 s/10 min:40 s/20 min (spray/interval, pre-stage: late-stage), 40 s/15 min:40 s/25 min, 40 s/20 min:40 s/30 min, which were expressed with by $T_{10:20}$, $T_{15:25}$, $T_{20:30}$, respectively, and the principal component cluster method was used to evaluate each the treatments, and sorted them comprehensively. The results showed that, 30 days after planting, the nutrient solution concentration, the spray frequency and the interaction between two factors could significantly increased the dry weight of all parts of the potato and the treatment $C_{0.8:1}T_{20:30}$ was the maximum; 60 days after planting, the biomass difference between treatments was significant and treatment $C_{1:1.2}T_{20:30}$ had the largest dry weight of whole plant. Small potato as $G \leq 3$ g of each treatment accounted for the largest proportion of potato grading, small potato as $3 < G \leq 5$ g had a small difference between among treatments, but the difference between for other grades was significant. The single plant number, single plant weight and equivalent yield of treatment $C_{1:1.2}T_{15:25}$ were the largest. Through principal component cluster analysis, the highest score was obtained by treatment $C_{1:1.2}T_{15:25}$, and the effects of each treatment on the growth of potato in aeroponic cultivation could be clustered into five categories. Treatment $C_{0.8:1}T_{20:30}$ and $C_{1:1.2}T_{15:25}$ were clustered into one category, and the comprehensive evaluation was first-class; The treatment $C_{0.6:0.8}T_{10:20}$, $C_{1:1.2}T_{20:30}$ and $C_{0.6:0.8}T_{15:25}$ were clustered into one category, and the comprehensive evaluation was second-class; The treatment $C_{0.8:1}T_{15:25}$ was clustered into one category, and the comprehensive evaluation was third-class; Treatment $C_{0.6:0.8}T_{20:30}$ and $C_{0.8:1}T_{10:20}$ were clustered into one category, and the comprehensive evaluation was fourth-class; Treatment $C_{1:1.2}T_{10:20}$ was clustered into one category, and the comprehensive evaluation was fifth-class. Therefore, increasing the nutrient solution concentration and prolonging the spray interval time appropriately were beneficial to the growth and increase yield of the potato in the aeroponic cultivation system.

Key words: aeroponic cultivation; potato; nutrient solution concentration; spray frequency; growth