

基于主成分分析的水培芹菜最佳钾浓度筛选

乔 源, 胡笑涛, 王 瑞, 张 栋

(西北农林科技大学, 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:钾(K)元素是营养液中的大量元素之一, K 浓度会影响水培芹菜的品质、产量、各元素的吸收利用。该试验以“四季香毛”芹菜为试材, 基于植物工厂水培芹菜试验, 利用主成分分析的多元统计方法分析了 K 浓度为 2、3、4、5、6 mmol·L⁻¹ 的营养液配方对芹菜产量、品质、主要营养元素利用效率及水分利用效率的影响。结果表明: 5 mmol·L⁻¹ 处理产量显著高于其它处理; 6 mmol·L⁻¹ 处理硝酸盐含量最低、维生素 C 含量最高; 营养液水分利用效率最高的处理是 3 mmol·L⁻¹, 所有元素的利用效率均在 K 浓度较低时比较高; 对产量、品质、主要营养元素利用效率和水分利用效率进行主成分分析, 提取 2 个主成分, 贡献率达到 89.36%, 具有一致的代表性, 计算综合得分, 6 mmol·L⁻¹ 处理最高, 为 2.008。因此适合芹菜水培的山崎配方营养液最佳 K 浓度应提高到 6 mmol·L⁻¹, 有利于提高产量和元素利用效率并改善芹菜品质。

关键词:水培芹菜; K 浓度; 利用效率; 主成分分析

中图分类号:S 636.304⁺.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)22-0005-06

营养液栽培是指将植物根系直接与营养液接触而进行的生产方式, 具有充分利用空间、经济效益高、同时能解决蔬菜淡季供应不足等优点, 成为蔬菜供应的一种新方式。芹菜属伞形科草本植物, 含有多种营养成分, 在已知蔬菜中芹菜的铁含量处于最高水平, 同时具有很高的药用价值^[1]。国内外研究者对营养液栽培的研究大都集中于生菜方面的研究, 鲜有芹菜研究的相关报道。王芳等^[2]通过田间试验研究了不同供钾(K)水平对芹菜产量、品质 and 经济效益的影响, 得出适宜当地芹菜的施 K 量; 张泽彦等^[3]对芹菜施用不同量的硫酸锌, 表明施锌显著提高了芹菜各部位糖和维生素 C 的含量; 周娅等^[4]通过田间试验研究了氮肥品种组合及不同肥料配施对芹菜生长和硝酸盐含量、芹菜产量和品质的影

响, 得出了产量最高的肥料配比方式; 刘明月等^[5]采用三因素五水平通用旋转组合设计, 对氮(N)、磷(P)、钾(K)施用量与芹菜硝酸盐积累和产量的相关性进行了研究, 得出了无土栽培芹菜 N、P、K 最优组合方案; 桑连海等^[6]、张玲玲等^[7]对芹菜净化作用与环境效益做了相关研究。前人对芹菜产量、品质的研究主要集中于大田试验, 对水培芹菜的研究多集中于环境效益方面。主成分分析是把多个指标化为少数几个综合指标的统计分析方法。它通过提取的几个综合因子来代表原始众多的变量, 而且变量彼此之间互不相关, 因此能够实现用较少指标来反映原来众多指标的主要信息, 因而在许多领域的综合评价中被广泛应用^[8]。基于此, 该试验以自然光温室水培芹菜试验数据为基础, 对产量、维生素 C、硝酸盐、可溶性蛋白质、可溶性糖及各元素利用效率等评价指标进行主成分分析, 从而获取适宜芹菜水培的营养液中氮含量。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育

第一作者简介:乔源(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为农业水土工程。E-mail: 348328595@qq.com.

责任作者:胡笑涛(1972-), 男, 博士, 教授, 现主要从事节水灌溉理论与技术等研究工作。E-mail: huxiaotao11@nwsuaf.edu.cn.

基金项目:国家“863”计划资助项目(2013AA103004)。

收稿日期:2016-07-21

weight were all reduced, but root dry weight, root shoot ratio all increased, which the inhibition of low temperature was more significant. Low and suboptimal temperature also reduced SPAD value, net photosynthetic rate, transpiration rate, intercellular CO₂ concentration, stomatal conductance of the grafted cucumber. And there were differences between different grafting, figleaf gourd at low temperature was better than the pumpkin on the performance.

Keywords: root zone temperature; grafted cucumber; growth characteristics; photosynthetic parameters

部国家重点实验室温室中进行,位于杨凌西北部,地理位置为北纬 $38^{\circ}18'$,东经 $108^{\circ}40'$,海拔高度 521 m,多年平均气温 12.5°C 。年累积日照时数 1 900 h,年累积气温(超过 10°C)3 800 $^{\circ}\text{C}$ 。试验光照为自然光,光照时间为 $12\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$,昼夜温为 $25^{\circ}\text{C}/18^{\circ}\text{C}$ 。试验于 2014 年 5 月 1 日定植,6 月 9 日收获,共计 40 d。

1.2 试验材料

以“四季香毛”芹菜为供试材料,水源为当地自来水,杨凌地区自来水中钙离子含量 $52\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、镁离子含量 $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.3 试验方法

采用育苗移栽的方式,待芹菜长到五叶一心,高 5~6 cm 时,定植于规格为 $40\text{ cm}\times 27\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 水培箱中,每个水培箱中营养液为 10 L,每箱种植 4 棵,共设置 5 个不同 K 浓度处理,每个处理 6 次重复,共 30 箱。基本营养液大量元素采用标准的山崎配方^[9],通过改变配方中 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 和 KNO_3 含量设置 2、3、4、5、6 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 5 个不同 K 素浓度处理(表 1),微量元素采用通用配方(表 2)。每天早晚各通氧 1 h。每隔 4 d 测 1 次 pH、EC 值,控制 pH 5.5~6.5。每天早晚各通 1 次氧,每次 1 h。

表 1 5 种不同处理营养液大量元素配方

Table 1 Five different nutrient solution formulas of macro-element $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

处理 Treatment	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	KNO_3	$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$
K1	40.12	20.2	12.3	6.9
K2	28.32	30.3	12.3	6.9
K3	16.52	40.4	12.3	6.9
K4	4.72	50.5	12.3	6.9
K5	0.00	60.6	12.3	6.9

表 2 营养液微量元素通用配方

Table 2 General nutrient solution formula of micro-element

化合物名称 Name of compound	营养液中化合物含量 Compounds content in the nutrient solution	营养液中元素含量 Element content in the nutrient solution
EDTA-NaFe(含铁 14%)	30.00	5.60
H_3BO_3	2.86	0.50
$\text{MnSO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	2.13	0.50
$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.22	0.05
$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.08	0.02
$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.02	0.01

表 3 不同 K 浓度处理营养液下水培芹菜生长指标

Table 3 Growth indices of hydroponic celery deals with different potassium concentrations in nutrient solution

处理 Treatment	地上鲜质量 Aboveground fresh weight/g	地下鲜质量 Underground fresh weight/g	地上干质量 Aboveground dry weight/g	地下干质量 Underground dry weight/g	根冠比 Root cap ratio
K1	$30.35\pm 0.69\text{c}$	$5.62\pm 0.20\text{c}$	$3.10\pm 0.75\text{a}$	$0.28\pm 0.01\text{b}$	$0.11\pm 0.02\text{a}$
K2	$37.74\pm 0.82\text{b}$	$9.60\pm 0.38\text{b}$	$3.82\pm 0.19\text{a}$	$0.48\pm 0.13\text{ab}$	$0.13\pm 0.03\text{a}$
K3	$38.76\pm 0.87\text{b}$	$12.76\pm 0.92\text{a}$	$3.93\pm 0.03\text{a}$	$0.64\pm 0.13\text{a}$	$0.16\pm 0.03\text{a}$
K4	$41.39\pm 0.88\text{a}$	$9.12\pm 0.20\text{b}$	$4.24\pm 0.29\text{a}$	$0.46\pm 0.14\text{ab}$	$0.11\pm 0.03\text{a}$
K5	$17.29\pm 0.39\text{d}$	$4.53\pm 0.59\text{c}$	$1.72\pm 0.15\text{b}$	$0.23\pm 0.03\text{b}$	$0.13\pm 0.01\text{a}$

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异达到 5% 的显著性水平,下同。

Note: Values followed by different lowercase letters in a column are significant among treatment at 5% level, the same below.

1.4 项目测定

芹菜鲜、干质量的测定均采用 ES-3002H 电子天平,精度 0.01 g; pH 采用 FE20K PH 计测定,每隔 4 d 测 1 次,控制 pH 5.5~6.5;电导率测定采用 FE:30KPLUS 电导率仪,每隔 2 d 测定 1 次。营养液中氮元素含量的测定采用碱性过硫酸 K 消解紫外分光光度法^[10];磷元素中总磷采用钼酸铵分光光度法测定^[10];钙、镁、钾原子利用吸收分光光度法测定^[10];40 d 收获时测定芹菜各品质指标,硝酸盐含量采用比色法测定^[10];可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定^[11];可溶性糖含量的测定采用蒽酮法^[11];维生素 C 含量的测定采用滴定法^[12]。

1.5 数据分析

所有数据通过 SPSS 17.0 软件进行统计检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同 K 浓度营养液对水培芹菜生物量的影响

K 作为植物必需的三大营养元素之一,同时也是作物体内分布最多的金属元素,K 是植物体内 60 多种酶的活化剂,在植物代谢与呼吸作用中起到主要作用,被称为“品质元素”。K 浓度对芹菜各生长指标影响显著,表 3 为不同 K 浓度处理下水培芹菜的生长指标,可以看出,随着 K 元素浓度的提高,地上鲜、干质量均先增后减,在 K4 处理下的地上鲜、干质量均达到最大,K4 处理下的地上鲜质量与 K1、K2、K3、K5 处理之间存在显著性差异;地下鲜、干质量以 K3 最大,K2、K4 次之,且与 K1、K5 处理之间存在显著性差异;根冠比是指地上与地下鲜质量或是干质量的比值,大小能够反映植物地下与地上部分的相关性,可以看出 K3 的根冠比最高,但不同处理间差异不大。5 个生长指标的共同规律均为先增大后减小,说明适宜的 K 浓度有利于芹菜生长,过高的 K 浓度抑制芹菜的生长。

对芹菜产量和 K 浓度之间的关系进行拟合,得出回归方程: $Y=46.236x-6.0936x^2-33.826$ ($R^2=0.9202$, $P<0.05$),式中 x 表示 K 的浓度, Y 表示芹菜的单株产量(地上鲜质量+地下鲜质量),从回归方程可以看出,随着 K 元素浓度的增加,产量 Y 呈开口向下的抛物线,在 K 元素浓度 x 为 $3.79\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,单株产量 Y 最大。

2.2 不同 K 浓度营养液对水培芹菜品质的影响

近年随着食品安全事故频频发生,产量已经不能满足人们的需求,蔬菜品质更是越来越受重视。水培蔬菜的品质调控一直以来是众多学者研究的热点。硝酸盐是蔬菜品质评价的重要指标之一^[13],国家质检总局规定叶菜硝态氮含量应低于 3 000 mg·kg⁻¹。由表 4 可知,不同浓度 K 处理对芹菜品质影响显著,维生素 C 可以预防癌症,它能够阻断致癌物 N-亚硝基化合物合成,营养液浓度对芹菜叶片维生素 C 含量影响较大,芹菜叶片中维生素 C、可溶性蛋白质含量随 K 浓度的变化规律一致,均为 K5>K4>K3>K2>K1,说明 K 的浓度越高越有利于维生素 C 和可溶性蛋白质的积累;硝酸盐属于负效应品质,随着 K 浓度的增加硝酸盐含量降低,说明在硝酸盐控制方面高 K 优于低 K;可溶性糖的含量与处理间的关系为 K3>K4>K5>K2>K1。

表 4 不同钾浓度处理营养液对水培芹菜品质指标的影响

Table 4 Quality indices of hydroponic celery dealt with different potassium concentrations in nutrient solution				
处理 Treatment	硝酸盐含量 Nitrate content/(μg·g ⁻¹)	可溶性糖含量 Soluble sugar content/(mg·g ⁻¹)	维生素 C 含量 Vitamin C content/(mg·g ⁻¹)	可溶性蛋白质含量 Soluble protein content/(mg·g ⁻¹)
K1	1 563.76±42.00a	1.34±0.08a	0.21±0.02d	5.01±1.22b
K2	1 519.64±45.98ab	1.36±0.06a	0.31±0.04c	5.60±1.41b
K3	1 444.05±35.57b	1.51±0.17a	0.38±0.01bc	6.74±1.14b
K4	1 220.35±24.27c	1.44±0.21a	0.42±0.04b	7.01±0.37a
K5	1 051.29±29.80d	1.41±0.19a	0.58±0.04a	7.60±1.23a

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,它的合成需要多种元素。表 5 是不同 K 浓度处理下芹菜叶片中叶绿素含量,可以看出不同 K 浓度营养液处理下叶绿素含量差异显著,其中叶绿素 b 含量随着 K 浓度增加而增加,叶绿素 a 含量随着 K 浓度先增后减,在 K4 处理下达到最大,K5 处理下稍微下降,类胡萝卜素含量随 K 浓度的增加呈现出先增大后减小的规律,其中最高的是 K3,最低的是 K1,前者是后者 1.96 倍。

表 5 不同钾浓度处理营养液对水培芹菜叶绿素含量的影响

Table 5 Chlorophyll content of hydroponic celery dealt with different potassium concentrations in nutrient solution mg·g ⁻¹ FW			
处理 Treatment	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content	类胡萝卜素含量 Carotenoid content
K1	2.41±0.04d	0.77±0.01c	0.55±0.04c
K2	2.73±0.03c	0.93±0.02c	0.79±0.02bc
K3	3.42±0.06b	1.13±0.04b	1.08±0.17a
K4	3.66±0.02a	1.28±0.05ab	0.86±0.05ab
K5	3.32±0.04b	1.34±0.11a	0.70±0.01bc

2.3 不同 K 浓度营养液对水培芹菜水分、主要营养元素利用效率的影响

水分利用效率是指单位水质量所制造的干物质量,营养液栽培有节水、省水的优点,水分利用效率越高代表单位水质量的产出量越高。从表 6 可以看出,不同浓度营养液处理下水分利用效率差异很大,K2 处理下的

通过数学分析,建立了芹菜各品质指标与 K 浓度之间的回归方程,得到硝酸盐含量 Y1 与 K 浓度 x 的线性方程:Y1=1 491.5+95x-28.428x²(R²=0.988 4,P<0.05),当 K 浓度为 1.671 mmol·L⁻¹时,芹菜叶片硝酸盐含量最大;可溶性糖含量 Y2 与 K 浓度 x 的非线性方程:Y2=1.004+0.204 9x-0.022 9x²(R²=0.664 9,P<0.05),当 K 浓度为 4.474 mmol·L⁻¹时,芹菜叶片可溶性糖含量最大;维生素 C 含量 Y3 与 K 浓度 x 的线性方程:Y3=0.13+0.033 6x+0.006 4x²(R²=0.965 9,P<0.05),随着 K 供应浓度的增加,维生素 C 含量逐渐升高;可溶性蛋白质含量 Y4 与 K 浓度 x 的非线性方程:Y4=2.886+1.156 1x-0.062 1x²(R²=0.977 2,P<0.05),当 K 浓度为 9.308 mmol·L⁻¹时,芹菜叶片可溶性蛋白质含量最大。

表 6 不同钾浓度营养液对芹菜营养液水分利用效率的影响

Table 6 Water utilization efficiency of hydroponic celery dealt with different potassium concentrations in nutrient solution	
处理 Treatment	水分利用效率 Water use efficiency
K1	0.376±0.030 6ab
K2	0.541±0.133 8a
K3	0.508±0.103 7ab
K4	0.481±0.135 2ab
K5	0.214±0.033 8b

注:水分利用效率=生物量/营养液中水分减少量。
Note:Water use efficiency=Biomass/Loss of moisture in nutrient solution.

水分利用效率显著较高,分别是最低浓度 K1 和最高浓度 K5 处理的 1.44、2.53 倍,表明浓度过高或者过低都会降低植物水分利用效率。

营养液元素利用效率是指植物对养分的吸收利用情况,现代农业追求低耗高效生产,因此研究元素利用效率能够为低耗高产的营养液生产提供依据。氮元素是植物生长发育所必需的主要元素之一。从表 7 可以看出,氮元素利用效率为 K1>K3>K4>K2>K5,其中 K1 是 K5 的 2.321 倍,随着营养液中氮元素浓度升高,其利用效率是先增加后急剧下降;磷元素是合成核酸所必需的元素之一,可以得出 K1、K2 处理下的利用效率显著高于 K3、K4、K5;K 元素作为品质元素,在提高作物品

质方面作用突出^[12],K1、K2 处理下的利用效率明显高于 K3、K4、K5;钙元素的利用效率大小顺序为 K4>K3>K5>K2>K1,K4 是 K1 的 4.208 倍;镁是叶绿素合成中的必需元素,不同浓度营养液浓度对镁元素的利

用效率影响较大,K5 处理的利用效率最低,K2 处理最高,K5 处理仅仅占 K2 处理的 21.30%,K1、K3 处理间相差不大。

表 7 不同钾浓度营养液处理下主要营养元素利用效率

Table 7 Main element utilization efficiency of hydroponic celery dealt with different potassium concentrations in nutrient solution

处理 Treatment	氮效率 Nitrogen utilization efficiency	磷效率 Phosphorus utilization efficiency	钾效率 Potassium utilization efficiency	钙效率 Calcium utilization efficiency	镁效率 Magnesium utilization efficiency
K1	4.92±0.26a	30.89±0.64b	5.43±0.12a	1.06±0.09c	7.01±0.22b
K2	3.47±0.10b	39.22±3.22a	3.52±0.20b	1.71±0.42bc	10.75±0.12a
K3	4.73±0.08a	27.78±0.74bc	3.12±0.15 c	3.41±0.70ab	6.81±0.44b
K4	4.72±0.18a	25.49±0.92c	2.74±0.09c	4.46±0.58a	5.38±0.06c
K5	2.12±0.05c	14.14±1.01d	1.22±0.01d	2.05±0.32b	2.29±0.06d

注:营养元素利用效率=生物量/营养液营养元素减少量。

Note:Nutrient elements use efficiency=Biomass/Loss of nutrient elements in nutrient solution.

2.4 基于主成分分析的水培芹菜最佳浓度营养液筛选

主成分分析与评价是一种多元统计方法,通过求解主成分,可以在少损失原有指标信息的情况下,实现减少变量个数与综合评价的目的。

2.4.1 标准化处理 该试验对于正向型指标无量纲化处理采用先均值化法后标准化法对指标处理^[14-15],其计算公式为:

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij}}{\bar{X}_{ij}} \quad (1),$$

式中:为经过均值化处理的第 j 个指标到第 i 个处理的值;为第 j 个指标的第 i 个处理的原始数据值; \bar{X}_{ij} 为第 j 种指标的均值。对低优指标需要进行同趋化处理,则取的倒数作为无量纲化的结果。标准差标准化法是在均值化法的基础上进行二次无量纲化处理,采用标准化处理,其计算公式为:

$$Z_{ij} = \frac{Y_{ij} - \bar{Y}_{ij}}{\sigma_j} \quad (2),$$

式中: Z_{ij} 为二次标准化处理后的指标值; \bar{Y}_{ij} 为均值; σ_j 为第 j 种指标的标准差。

2.4.2 主成分分析 主成分分析是通过原始变量的少数几个线性组合来揭示大部分信息,并且各个指标之间保持独立,直到抽取信息与原指标相差不多为止的降维和简化数据的分析,若变量用 X_1, X_2, \dots, X_j 表示,则主成分分析数学模型如下:

$$\begin{cases} Q_1 = u_{11}X_1 + u_{12}X_2 + \dots + u_{1j}X_j \\ Q_2 = u_{21}X_1 + u_{22}X_2 + \dots + u_{2j}X_j \\ \vdots \\ Q_k = u_{k1}X_1 + u_{k2}X_2 + \dots + u_{kj}X_j \end{cases} \quad (3),$$

式中:($k=1, 2, \dots, k$) 为原变量第 1, 2, \dots, k 个主成分, u_{kj} 为第 k 个主成分中第 j 种指标的系数,可用矩阵表示为:

$$Q = UX \quad (4),$$

对无量纲化处理后的指标值进行计算得出的矩阵特征

值和相应的方差贡献率,利用因子荷载量的相应算法则计算特征向量,为达到获取主要信息并减少指标数量的目的,一般只选择累积方差贡献率不小于 85% 的主成分作为主要主成分进行综合评价。最终计算结果可由以下函数加权所得:

$$Q = \sum_{j=1}^k \beta_j Q_j \quad (5),$$

式中: Q 为最终得分, β_j ($j=1, 2, \dots, k$) 表示不同特征值的方差贡献率。

2.4.3 芹菜产量、品质、主要元素利用效率及水分利用效率指标的相关矩阵 采用试验中不同 K 浓度营养液处理下芹菜的总鲜质量(地上+地下)、硝酸盐、维生素 C、可溶性蛋白质、可溶性糖、叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、氮元素利用效率、磷元素利用效率、钾元素利用效率、钙元素利用效率、镁元素利用效率作为评价指标,为消除不同指标差距数量级过大,采用除平均值进行数据标准化处理,再对所有指标进行主成分分析。为保证评价指标的优劣方向一致,需要对低优指标进行同趋化处理,即在取低优指标的负值。相关参数的统计量见表 8,样本相关矩阵 R 见表 9。

2.4.4 特征值、特征向量和品质综合主成分 试验采用 IBM SPSS Statistics 20 软件对所有指标进行主成分分析计算,相关特征值、特征向量、贡献率、累计贡献率见表 10。从表 10 可知,前 2 个主成分的累计方差贡献率达到了 89.362%,超过了 85%,既包含了原始变量的大部分变异信息,又可降低变量个数。根据特征值大于 1 的原则提取了 2 个主成分,特征值为 8.173、4.338。其中第一主成分 f_1 的贡献率是 58.378%,它所占超过一半的比例,包含的信息量比较大,解释能力最强,其中特征向量中绝对值较大的分量是可溶性蛋白质(X_2)、维生素 C(X_3)、硝酸盐(X_4)、叶绿素 b(X_7)、K 的效率(X_{10}),值分别为 0.34、0.34、0.34、0.34、-0.32,这 5 个指标从不同方面反映了不同营养液浓度对芹菜的影响。第二主成

分 f_2 的贡献率为 30.984%,特征向量中绝对值较大的分量为芹菜鲜质量(X_1)、类胡萝卜素(X_8)、钙的效率(X_9)。最后结果见表 11,由表 11 可以看出,综合得分最高的是 K5 处理,最低的是 K1 处理,故最低耗高效的营养液浓度为 K5 处理。

表 8 不同钾浓度营养液处理下芹菜评价参数统计量

Table 8 Statistic parameters of hydroponic celery in different potassium concentrations

评价指标 Evaluation index	统计量 Statistic			
	平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	标准差 Standard deviation
X_1	1.000 0	0.527	1.219	0.302 22
X_2	1.000 0	0.783	1.189	0.166 14
X_3	1.000 0	0.549	1.099	0.365 29
X_4	-1.000 0	-1.150	-0.773	0.159 80
X_5	1.000 0	0.951	1.069	0.047 51
X_6	1.000 0	0.777	1.179	0.166 97
X_7	1.000 0	0.704	1.231	0.220 38
X_8	1.000 0	0.696	1.361	0.247 87
X_9	1.000 0	0.417	1.344	0.542 13
X_{10}	1.000 0	0.381	1.097	0.473 64
X_{11}	1.000 0	0.355	1.667	0.474 25
X_{12}	1.000 0	0.532	1.232	0.299 23
X_{13}	1.000 0	0.514	1.426	0.330 98
X_{14}	1.000 0	0.505	1.276	0.312 58

注: X_1 为芹菜鲜质量、 X_2 为可溶性蛋白质、 X_3 为维生素 C、 X_4 为硝酸盐、 X_5 为可溶性糖、 X_6 为叶绿素 a、 X_7 叶绿素 b、 X_8 为类胡萝卜素、 X_9 为钙元素利用效率、 X_{10} 为 K 元素利用效率、 X_{11} 为镁元素利用效率、 X_{12} 为氮元素利用效率、 X_{13} 为磷元素利用效率、 X_{14} 为水分利用效率。下同。

Note: X_1 as fresh weight of celery, X_2 as soluble protein, X_3 as vitamin C, X_4 as nitrate, X_5 as soluble sugar, X_6 as chlorophyll a, X_7 as chlorophyll b, X_8 as carotenoid, X_9 as calcium utilization efficiency, X_{10} as potassium utilization efficiency, X_{11} as magnesium utilization efficiency, X_{12} as nitrogen utilization efficiency, X_{13} as phosphorus utilization efficiency, X_{14} as water utilization efficiency. The same below.

表 9 不同钾浓度营养液处理下芹菜评价参数相关矩阵

Table 9 Correlation matrix about evaluation parameters of hydroponic celery in different potassium concentrations

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}
X_1	1													
X_2	-0.242	1												
X_3	-0.466	0.949	1											
X_4	-0.509	0.909	0.947	1										
X_5	0.349	0.655	0.421	0.302	1									
X_6	0.184	0.895	0.721	0.71	0.812	1								
X_7	-0.182	0.987	0.932	0.923	0.604	0.915	1							
X_8	0.652	0.429	0.206	0.025	0.893	0.669	0.404	1						
X_9	0.540	0.618	0.364	0.401	0.771	0.903	0.673	0.727	1					
X_{10}	0.314	-0.938	-0.979	-0.889	-0.462	-0.753	-0.932	-0.331	-0.426	1				
X_{11}	0.665	-0.751	-0.752	-0.852	-0.312	-0.538	-0.716	0.117	-0.246	0.609	1			
X_{12}	0.690	-0.477	-0.726	-0.618	0.186	-0.084	-0.451	0.243	0.308	0.718	0.377	1		
X_{13}	0.678	-0.809	-0.826	-0.884	-0.355	-0.568	-0.764	0.053	-0.237	0.698	0.989	0.475	1	
X_{14}	0.974	-0.384	-0.554	-0.632	0.201	0.003	-0.329	0.570	0.354	0.388	0.813	0.616	0.813	1

表 10 主要成分系数和贡献率

Table 10 Main component coefficient and the contribution rate

主成分 Principal component	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	特征值 Eigenvalue	贡献率 Rate of contribution/%
f_1	-0.14	0.34	0.34	0.34	0.19	0.28	0.34	0.09	0.17	-0.32	-0.30	-0.19	-0.31	-0.19	8.173	58.378
f_2	0.43	0.09	-0.04	-0.08	0.35	0.27	0.10	0.43	0.39	-0.02	0.15	0.27	0.14	0.38	4.338	30.984

表 11 不同钾浓度营养液处理下芹菜所有指标在一二主成分上的综合得分

Table 11 Composite score of the two main components indicating four indices in different potassium concentrations

序号 Number	得分指标 Score index	第一主成分 First principal component	第二主成分 Second principal component	综合得分 Synthesis score	位次 Order
1	K1	-0.055	2.544	0.756	5
2	K2	0.176	3.126	1.071	4
3	K3	1.018	3.594	1.708	3
4	K4	1.405	3.570	1.926	2
5	K5	2.258	2.227	2.008	1

3 结论

近年来随着科学技术的发展,水培蔬菜备受关注,其中品质、产量以及能耗等各种问题都已成为研究的热点。营养液是水培作物赖以生存的重要环境,更是植物的营养来源。不同浓度 K 元素营养液对水培芹菜产量、品质、水分利用效率、元素利用效率等影响较大。

通过分析可知,K 浓度对生物量的影响呈开口向下抛物线状,在 K4 处理累积量达到最大,通过拟合分析,得到在 K 元素浓度为 $3.79 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,单株产量最高。不同处理下根冠比差异不显著。当 K 浓度为 $1.671 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,芹菜叶片硝酸盐含量最大;当 K 浓度为 $4.474 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,芹菜叶片可溶性糖含量最大;随着 K 供应浓度的增加,维生素 C 含量逐渐升高;当 K 浓度为 $9.308 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,芹菜叶片可溶性蛋白质含量最大;水分利用效率能够反映单位水重的产出,随着 K 浓度的提高先增加后降低,在 K2 处理达到最高,为 0.541,适宜浓度的 K 元素能够提高水培作物对水分的利用效率。所有元素的利用效率均在 K 浓度较低的时候比较高。尽管 K 是一种品质元素,在该试验设置范围内,随着 K 元素浓度的增加能提高水培芹菜的品质,但过高会使得元素利用效率降低,造成能源浪费。

通过主成分分析的方法对不同 K 浓度处理下芹菜品质、产量、各种利用效率进行评价,将多个指标转化成几个综合指标,通过计算得到每个处理的综合得分,得分最高的是 K5 处理,综合得分 2.008。因此该浓度是芹菜水培最适宜 K 浓度。

参考文献

- [1] 周浩,彭克勤,沈志锦,等.芹菜对铁的吸收及铁对其生长和品质的影响[J].中国农学通报,2006,22(7):385-386.
- [2] 王芳,扬长新,韩继山,等.不同供 K 水平对芹菜产量和品质的影响[J].西北农业学报,2009,18(5):258-261.
- [3] 张泽彦,孙克刚,吕爱英,等.硫酸锌对芹菜产量和品质的影响[J].中国蔬菜,1998(6):18-20.
- [4] 周娅,王昌全,陈远学,等.不同氮肥及肥料组合对芹菜生长和硝酸盐含量的影响[J].土壤肥料,2004(1):10-13.
- [5] 刘明月,秦玉芝,蔡雁平,等. N P K 施用量与芹菜硝酸盐积累和产量的相关性[J].中国蔬菜,1998(6):4-7.
- [6] 桑连海,黄薇,陈进,等.水培芹菜的植物学特征及环境效益分析[J].长江科学院院报,2009,26(7):11-13.
- [7] 张玲玲,李兆华,刘华吉,等.水培芹菜净化不同浓度沼液的试验研究[J].长江流域资源与环境,2011,20(1):154-158.
- [8] 陈腊蛟,冯利华,毛小军.主成分分析法在水资源承载力影响因子评价中的应用[J].水利科技与经济,2006,12(6):362-364.
- [9] 郭世荣.无土栽培学[M].北京:中国农业出版社,2011.
- [10] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [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,1999.
- [12] 史树德,孙亚卿,魏磊.植物生理学试验指导[M].北京:中国林业出版社,2011.
- [13] 黄启为,彭建伟,罗建新,等.化肥对蔬菜硝酸盐含量的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2002,28(5):387-390.
- [14] 李浩鑫,邵东国,尹希,等.基于主成分分析和 Copula 函数的灌溉用水效率评价方法[J].农业工程学报,2015,31(11):96-102.
- [15] PALTA J A,KBATA T,TURNER N C,et al. Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influenced by post-anthesis water deficits[J]. Crop Sci,1994,34:118-124.

Certification in Optimum of Potassium Concentration Applied to Hydroponic Celery Based on Principal Component Analysis

QIAO Yuan, HU Xiaotao, WANG Rui, ZHANG Dong

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education/Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: As the macro-element in nutrient solution, potassium levels directly influence the yield, quality and utilization efficiency of hydroponic celery. Using multivariate statistical method of principal components analysis, this research studied the impacts to the four targets of hydroponic celery, cultivated in plant factory, by potassium levels of 2, 3, 4, 5, 6 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively. The results showed that the raw weight of treatment 5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ was significantly greater than others, and the least content of nitrate and highest content of vitamin C appeared in 6 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, while water utilization efficiency in 3 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. The utilization efficiency of all elements obtained a higher level when dealt with relatively dense concentration of potassium. The principal components analysis about yield, quality, element and water utilization efficiency obtained a contribution rate 89.36% with two principal components. The treatment 6 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ possessed the highest comprehensive score of 2.008, which indicated that the potassium concentration around 6 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ prepared in nutrient solution would gain a preferable yield, quality, element and water utilization efficiency of hydroponic celery.

Keywords: hydroponic celery; potassium concentration; utilization efficiency; principal component analysis