

毛竹实生苗水培体系初步建立

邵继锋, 桂仁意, 季海宝, 李国栋, 方伟

(浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 浙江 临安 311300)

摘要: 为建立毛竹 *Phyllostachys pubescens* 实生苗适宜的水培体系, 以毛竹实生苗为材料, 通过比较不同处理下毛竹实生苗的叶面积、生物量和光谱反射特征, 以筛选 Yoshida 培养液为基础的水培营养条件。结果表明: 1/2 Yoshida 叶面积、增加生物量和光谱反射特征都优于其他 Yoshida 比例处理, 其中生物量增加达到对照的 97.9%。氮、磷、钾单因素试验表明氮素浓度 3.0 mmol·L⁻¹ 处理各指标优于 1.0, 2.0, 4.0, 5.0 mmol·L⁻¹ 处理; 磷素浓度 1.0 mmol·L⁻¹ 处理优于 0.5, 1.5, 2.0 mmol·L⁻¹ 处理; 钾素浓度 1.5 mmol·L⁻¹ 处理优于 0.5, 1.0, 2.0, 2.5 mmol·L⁻¹ 处理。氮、磷、钾三因素三水平正交试验 $L_9(3^3)$ 表明, 氮素 4.0 mmol·L⁻¹, 磷素 0.5 mmol·L⁻¹ 和钾素 1.0 mmol·L⁻¹ 为较适宜毛竹实生苗生长的浓度配比。图 12 表 6 参 35

关键词: 森林培育学; 毛竹; 实生苗; 生物量; 水培

中图分类号: S723.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2011)01-0086-09

A preliminary study on establishment of hydroponic culture system for *Phyllostachys pubescens* seedlings

SHAO Ji-feng, GUI Ren-yi, JI Hai-bao, LI Guo-dong, FANG Wei

(The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To establish a solution culture protocol for hydroponic culture experiments with *Phyllostachys pubescens* (moso bamboo) seedlings, comparisons of leaf-area, increased biomass, and reflectance spectral characteristics were made using Yoshida nutrient solution of 1/4, 1/2, 1, 3/2 and soil culture as a control (ck). Also, experiments for N with 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, and 5.0 mmol·L⁻¹ treatments; for P with 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 mmol·L⁻¹ treatments; and for K with 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 mmol·L⁻¹ treatments using univariate and multivariate statistics as well as three level (N: 2, 3, 4 mmol·L⁻¹; P: 0.5, 1.0, 1.5 mmol·L⁻¹; K: 0.5, 1.0, 1.5 mmol·L⁻¹) Orthogonal Tests [$L_9(3^3)$] were conducted. Results showed that leaf-area, increased biomass, and reflectance spectral characteristics of with a 1/2 Yoshida nutrient solution was superior to other strengths with an increased biomass of 97.9% of compared to ck. For N the 3.0 mmol·L⁻¹ treatment was superior; For P 1.0 mmol·L⁻¹ were was superior; and for K 1.5 mmol·L⁻¹ was superior. When N, P, and K levels were tested together using orthogonal testing, optimum seedling growth was with 4.0 mmol·L⁻¹ N, 0.5 mmol·L⁻¹ P, and 1.0 mmol·L⁻¹ K. [Ch, 12 fig. 6 tab. 35 ref.]

Key words: silviculture; *Phyllostachys pubescens* (moso bamboo); seedling; biomass; hydroponic culture

毛竹 *Phyllostachys pubescens* 生长快, 成材早, 产量高, 用途广, 收益大, 是中国南方重要的森林资源^[1]。有关毛竹栽培技术、病虫害防治、毛竹经营管理等方面的研究报道较多^[2-4]。水培是无土栽培的主要形式之一^[5-6], 作为一种重要的研究手段, 因它可人为控制营养液中的盐分、养分、溶解氧、酸

收稿日期: 2010-03-03; 修回日期: 2010-07-05

基金项目: 浙江省农业重大专项重点项目(2006C12112)

作者简介: 邵继锋, 从事竹林培育与利用研究。E-mail: brianshao888@yahoo.com.cn。通信作者: 方伟, 教授, 博士, 从事森林培育学等研究。E-mail: fwl@zafu.edu.cn

碱度和温度等环境等^[7]，在蔬菜、花卉栽培中得到了广泛的应用^[8-11]。关于毛竹水培的研究，尚未见有报道。叶片是植物进行光合作用的器官，是有机营养的供应者，叶面积大小是表征植株生长发育良好与否的重要标志之一^[12]。已有的研究表明，生物量是作物高产优质的前提，而生物量累积是以养分的吸收为基础的^[13-15]。故叶面积和生物量可作为植物生长好坏的指标。近年来，光谱技术已成为监测作物生长与营养信息的重要手段之一。根据作物叶片反射光谱特征变化可判定其生长及营养状况。绿色植物典型的光谱特征在近红外区域主要受叶片内部结构、生物量和含水量等影响，而在可见光范围内主要受色素影响^[16]。本研究以毛竹实生苗为材料，以叶面积、生物量、光谱反射特征为指标，筛选不同比例Yoshida，探讨营养液中不同氮磷钾的浓度梯度对毛竹实生苗的影响，试图建立毛竹水培技术体系，为毛竹相关研究提供基础。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试材料为长势一致的毛竹实生苗 (2~3 个月)。

1.2 试验设计

1.2.1 基础培养液筛选 参考相关资料^[17]及预备试验结果，设置 Yoshida 比例为 1/4Yoshida, 1/2Yoshida, Yoshida 和 3/2Yoshida，筛选最适比例 Yoshida 培养液。

1.2.2 氮磷钾单因素试验 以 1.2.1 筛选结果为基础培养液，根据预备试验设置氮素浓度为 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 mmol·L⁻¹，筛选适宜氮素浓度；根据预备试验设置磷素浓度为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mmol·L⁻¹，筛选适宜的磷素浓度；根据预备试验设置钾素浓度为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mmol·L⁻¹，筛选适宜的钾素浓度。

1.2.3 正交试验 根据单因素试验结果，选择各因素较适宜毛竹实生苗生长的 3 个水平见(表 1)，进行氮磷钾三因素三水平正交试验。以上试验种植 10 株·处理⁻¹，重复 3 次。都有独立盆栽 30 株实生苗为对照，塑料盆的规格为上口径 10 cm，下口径 7 cm，高 8 cm，盆栽所用基质为以 1 : 1 : 1 的比例混合的蛭石、泥炭、珍珠岩混合物，进行正常的水肥管理。

1.3 试验方法

试验于 2009 年 5 月至 2009 年 9 月，在浙江农林大学智能温室进行。以规格为 37 cm × 17 cm × 15 cm 的塑料盆作为培养盆，容器上覆盖穿有六孔的聚氯乙烯板。栽植毛竹实生幼苗 5 株·盆⁻¹，6 盆·处理⁻¹。培养时间为 6 周，每天持续通气，并调节 pH 5.0，隔 7 d 更新营养液 1 次。

测定项目和方法：生物量增加值。实验前称量植株的鲜质量 1 次，试验结束后再称量植株鲜质量 1 次，电子秤感量为 0.01 g(FA2004N 电子天平)。叶面积。用叶面积仪测定(AM300 叶面积仪)。光谱反射率。利用德国 WALZ 公司产的 UniSpec-SC 便携式光谱分析仪测定，测定波长范围为 310 ~ 1 130 nm，分辨率 < 10 nm，采样间隔 1 nm。光谱反射率经过专用的白色参比板标准化。选择在晴朗无云天气，于当天 9 : 00 - 11 : 00 测定，取其平均值作为光谱反射值。光谱分析：采用光谱归一化微分分析技术，对反射光谱进行一阶微分(差分)，其近似计算方法如下^[18]：

$$R'(\lambda_i) = \frac{dR(\lambda_i)}{d\lambda} = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{2\Delta\lambda}$$

其中： λ_i 为波段 i 波长值， $R(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 的光谱值， $\Delta\lambda$ 是相邻波长的间隔。从一阶微分光谱数值中提取基于光谱位置的主要变量。

反射光谱的红边特征：把实验所测得的光谱数据求一阶导数可以得出红边位置、红边幅值和红边面积^[19]。①红边位置(λ_{red})：在 680 ~ 760 nm 波段内一阶导数光谱的最大值所对应的波长。②红边幅值($d\lambda_{red}$)是当波长为红边位置时的一阶微分值。③红边面积：680 ~ 760 nm 的一阶导数光谱包围的面积。

表 1 因素与水平

Table 1 Factors and levels

水平	因素/(mmol·L ⁻¹)		
	A(氮)	B(磷)	C(钾)
1	2.0	0.5	0.5
2	3.0	1.0	1.0
3	4.0	1.5	1.5

数据处理: 采用 Excel 2003, SPSS 13.0 统计软件进行数据处理和作图。

2 结果与分析

2.1 不同 Yoshida 比例梯度筛选

2.1.1 不同 Yoshida 比例对毛竹实生苗叶面积和生物量的影响 表 2 表明, 4 个不同处理中, 随着溶液离子强度的增加, 植株的叶面积表现为先增加后降低的趋势, 1/2Yoshida 培养的实生苗叶面积最大 (307.133 mm²), 为对照的 64.5%, 而 Yoshida, 1/4Yoshida 和 3/2Yoshida 培养的叶面积依次降低。实生苗的生物量增加值变化趋势和叶面积变化趋势一致。1/2Yoshida 培养的实生苗生物量增加值最大, 为对照的 97.9%, 显著大于其余 3 种处理 ($P < 0.05$)。

2.1.2 不同 Yoshida 比例对毛竹实生苗光谱特征的影响 图 1 显示在紫外光区 (350 ~ 400

nm), 5 个处理反射率几乎一致, 而在可见光范围内 (400 ~ 700 nm), 3/2Yoshida 处理培养的毛竹实生苗的反射率最高, 形成 1 个最高的反射峰, Yoshida 处理次之, 而 1/2Yoshida 处理培养的毛竹实生苗反射率是 4 种比例 Yoshida 处理中最小的。峰值处的反射 1/4Yoshida, 1/2Yoshida, Yoshida 和 3/2Yoshida 依次为 0.195, 0.188, 0.202 和 0.209。可见 1/2Yoshida 处理最小, 接近对照反射率 0.162。在近红外高原区 (760 ~ 1 300 nm), 处理间叶片反射率随 Yoshida 溶液离子强度的增加而增加, 但 1/2Yoshida 反射率几乎和对照的一致。可以得知, 1/2Yoshida 处理的光谱反射率最接近对照的光谱反射率。在所有光谱特征中红边特征最明显, 故我们比较红边特征, 而红边恰恰是绿色描述植被色素状态和健康状态的重要指示波段, 这一范围是从反射率非常低的叶绿素红外吸收变化到非常高的红外反射率。这种变化由于叶片的散射作用^[20-21]也认为红边可作为植物受压抑 (胁迫状态) 的光谱指示波段区。比较一阶微分光谱 (图 2), 各处理的红边位置都在 702 nm 处, 没有发生位移, 而红边幅值随着离子强度的增大表现为先增加后降低的趋势, Yoshida 达到峰值 0.011 9, 1/2 Yoshida 处理与对照处于同一水平。比较红边面积 (图 3) 得出, 在 4 个处理中 1/2 Yoshida 处理面积最大, 仅次于对照的 0.476 8。从光谱特征分析, 1/2 Yoshida 处理为较优比例。通过叶面积、生物量和光谱特征的综合比较, 得出在 4 个比例 Yoshida 处理中, 1/2Yoshida 优于其他的 3 个比例, 故选择 1/2Yoshida 作为筛选氮磷钾的基本营养液配方。

2.2 不同氮素浓度梯度筛选

2.2.1 不同氮素浓度梯度对毛竹实生苗叶面积和生物量的影响 试验结果表明, 在氮素的 5 个浓度梯度中, 3.0 mmol·L⁻¹ 的营养液所培养的实生苗叶面积最大, 为 1 208.2 mm², 其次为 5.0 mmol·L⁻¹ (表 3); 最小的是 1.0 mmol·L⁻¹。比较叶面积可以得出, 氮素浓度为 3.0 mmol·L⁻¹ 配方为较有利于毛竹实生苗叶面积生长发育的氮素浓度配方。通过方差分析的多重比较得知, 对照和 3.0 mmol·L⁻¹ 处理显著高于其他的 4 个处理。说明, 在氮素浓度为 3.0 mmol·L⁻¹ 培养下, 毛竹实生苗叶面积优于其他 4 个处理。随着氮素浓度的增加, 生物量表现为先增加后降低的趋势, 在氮素浓度为 3.0 mmol·L⁻¹ 处理时, 实生苗增加达到峰值, 为 1.1 g·株⁻¹, 显著高于 1.0 和 2.0 mmol·L⁻¹ 处理, 4.0 及 5.0 mmol·L⁻¹ 处理之间没有显著差异。说明, 在氮素浓度为 3.0 mmol·

表 2 不同比例 Yoshida 溶液培养的毛竹实生苗平均叶面积和生物量增加值

Table 2 Average leaf area and increased biomass of moso bamboo seedling in different concentration of Yoshida treatments

处理	叶面积/cm ²	生物量/g
1/4Yoshida	265.767 ± 9.942 cd	0.150 ± 0.019 b
1/2Yoshida	307.133 ± 13.295 b	0.188 ± 0.023 a
Yoshida	292.267 ± 9.317 bc	0.170 ± 0.015 b
3/2Yoshida	249.100 ± 10.015 d	0.128 ± 0.016 b
对照	476.222 ± 30.601 a	0.192 ± 0.021 a

说明: 不同小写字母表示达到显著水平 ($P < 0.05$)。

表 3 不同氮素水平处理毛竹实生苗平均叶面积和生物量增加值

Table 3 Average leaf area and increased biomass of moso bamboo seedling in different nitrogen level treatments

处理/氮素水平/ (mmol·L ⁻¹)	叶面积/cm ²	生物量/g
1.0	813.267 ± 48.856 c	0.548 ± 0.067 c
2.0	841.433 ± 44.417 c	0.677 ± 0.083 c
3.0	1 208.200 ± 58.441 b	1.105 ± 0.138 b
4.0	824.067 ± 58.267 c	1.068 ± 0.171 b
5.0	851.667 ± 39.343 c	0.756 ± 0.118 bc
对照	1 455.400 ± 97.902 a	1.511 ± 0.342 a

说明: 不同小写字母表示达到显著水平 ($P < 0.05$)。

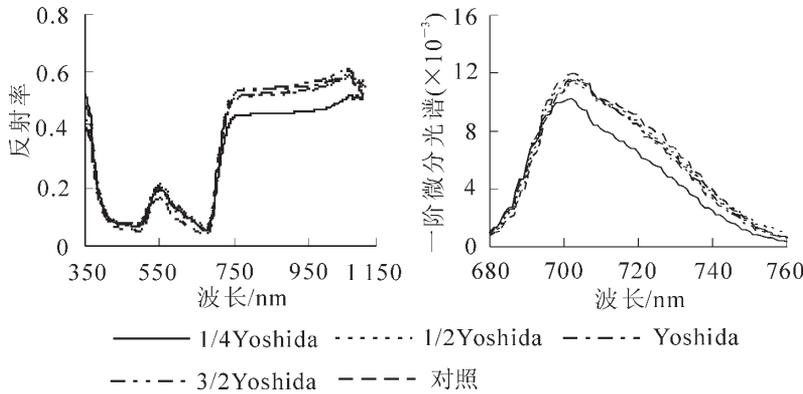


图 1 不同比例 Yoshida 处理毛竹实生苗植株反射光谱响应特征
Figure 1 Response characteristics of reflectance spectra in different concentration of Yoshida treatments

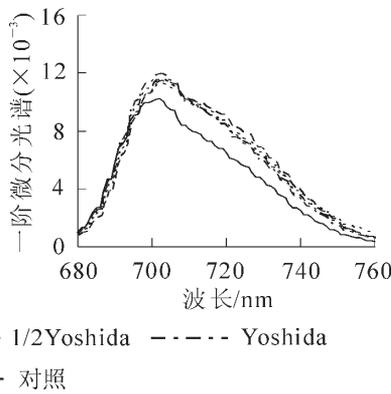


图 2 不同比例 Yoshida 处理毛竹实生苗植株一阶微分光谱
Figure 2 First derivative under different concentration of Yoshida treatments

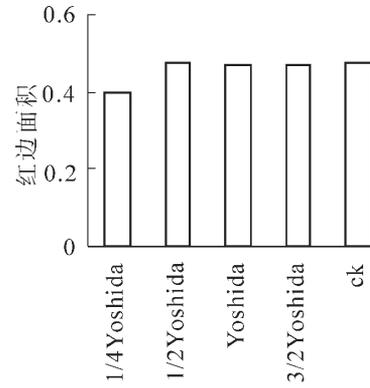


图 3 不同比例 Yoshida 处理毛竹实生苗植株红边面积
Figure 3 Summation of the first order derivatives inside red edge in different concentration of Yoshida treatments

L^{-1} 较有利于实生苗生物量的积累。

2.2.2 不同氮素浓度梯度对毛竹实生苗光谱特征的影响 分析图 4 可知，在紫外光区，5 个处理反射率几乎一致，而在可见光范围内，形成 1 个高反射峰。氮素不同浓度处理下，1.0、2.0、3.0、4.0 和 5.0 $mmol \cdot L^{-1}$ 峰值处的反射率分别为 0.228、0.203、0.169、0.1834 和 0.204。可见 3.0 $mmol \cdot L^{-1}$ 处理反射率最接近土培对照反射率 0.114 0。从图 4 可以看出，整个波形 3.0 $mmol \cdot L^{-1}$ 处理光谱反射率也是最接近土培对照的光谱反射率。一阶微分光谱可知（图 5），在不同氮素梯度处理下，红边位置都在 702 nm 处，没有发生变化，但红边幅值随着氮素浓度的增加表现为先减小后增加的趋势，3.0 $mmol \cdot L^{-1}$ 处理最小。比较红边面积可知（图 6），随着氮素浓度增大，红边面积先增大，在 3.0 $mmol \cdot L^{-1}$ 处理下红边面积最大，随后又降低。说明氮素浓度为 3.0 $mmol \cdot L^{-1}$ 处理为最适宜毛竹实生苗生长的氮素水平。综上所述，氮素水平 3.0 $mmol \cdot L^{-1}$ 处理为较适毛竹实生苗生长的氮素浓度。

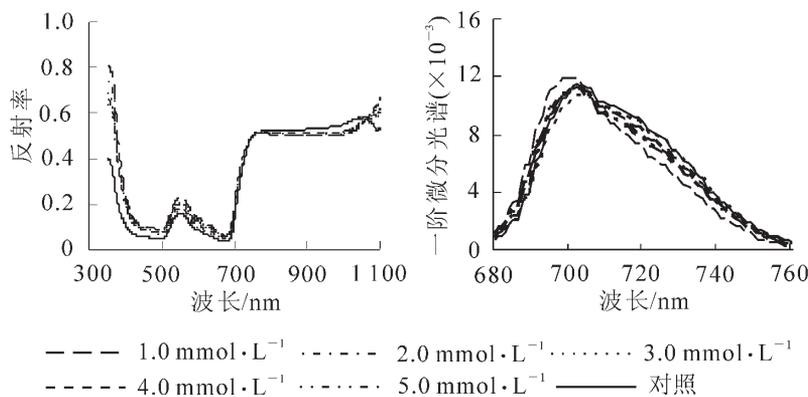


图 4 不同氮素水平处理毛竹实生苗植株反射光谱响应特征
Figure 4 Response characteristics of reflectance spectra in different nitrogen level treatments

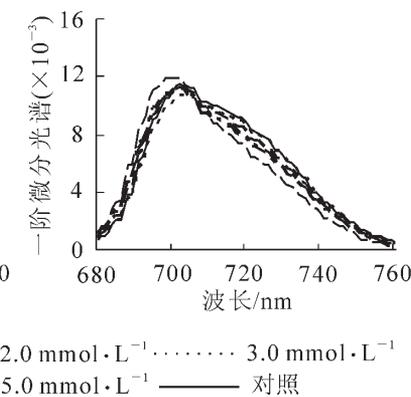


图 5 不同氮素水平处理毛竹实生苗植株一阶微分光谱
Figure 5 First derivative under different nitrogen level treatments

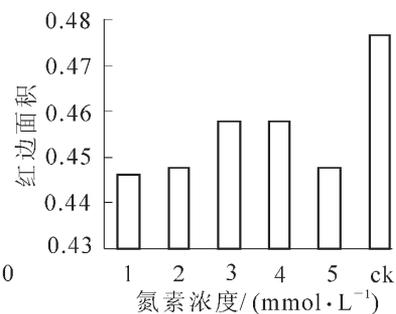


图 6 不同氮素水平处理毛竹实生苗植株红边面积
Figure 6 Summation of the first order derivatives inside red edge in different nitrogen level treatments

2.3 不同磷素浓度梯度筛选

2.3.1 不同磷素浓度梯度对毛竹实生苗叶面积和生物量的影响 试验结果表明，在磷素的 4 个梯度中，浓度为 1.0 $mmol \cdot L^{-1}$ 的营养液所培养的叶面积最大，其次为 0.5 $mmol \cdot L^{-1}$ ，最小的是 2.0 $mmol \cdot L^{-1}$ 营养液配方培养的实生苗叶面积。从表 4 可知，4 个处理下实生苗的叶面积分别占对照叶面积的 65%、88%、67% 和 53%。比较叶面积可以得出，磷素浓度为 1.0 $mmol \cdot L^{-1}$ 配方为较有利于毛竹实生苗叶片生

长发育的磷素浓度配方。生物量增加的趋势和叶面积一样；也是随着磷素水平的增加而增加，当达到 $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，生物量增加量又降低。由此，可知在 4 个磷素水平处理中， $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 培养的实生苗生物量的积累最接近对照水平。通过比较磷素 4 个处理下毛竹生物量增加量，可以得出磷素水平为 $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 更有利于毛竹实生苗生物量的累积。这和分析比较磷素叶面积特征一致。

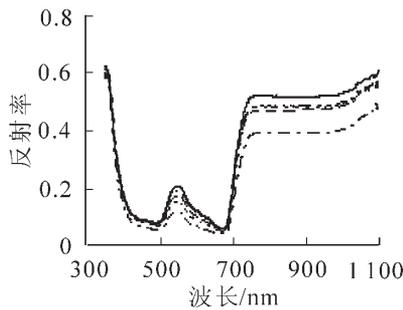
2.3.2 不同磷素浓度梯度对毛竹实生苗光谱特征的影响 分析图 7，5 个处理的波形都一致成“W”形。在可见光范围内，磷素水平 $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理培养的毛竹实生苗的反射率最高，形成 1 个最高的反射峰， $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理培养的毛竹实生苗反射率最小。峰值反射率 $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理为 0.149，最接近对照反射率 0.113。在近红外(800 ~ 1 000 nm)可以看出 1.5 和 $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 比较相近，但反射率都高于对照。比较红边一阶微分光谱(图 8)，在不同磷素处理下，红边位置都没有发生变化，而红边幅值表现为先降低再增高的趋势， $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理达到最低值，说明该处理生长较为正常。比较红边面积(图 9)，可知 $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理面积最大，并且高于对照水平，说明在氮素水平为 $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，实生苗生长最优。通过比较光谱特征，可筛选出磷素水平为 $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 较优。综上所述，磷素浓度 $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理为较适毛竹实生苗生长的磷素浓度。

表 4 不同磷素水平处理毛竹实生苗平均叶面积和生物量增加值

Table 4 Average leaf area and increased biomass of moso bamboo seedling in different phosphorus level treatments

磷素水平/($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	叶面积/ cm^2	生物量/g
0.5	$945.536 \pm 67.505 \text{ b}$	$0.548 \pm 0.067 \text{ c}$
1.0	$1\ 285.800 \pm 49.427 \text{ a}$	$0.677 \pm 0.083 \text{ c}$
1.5	$987.233 \pm 43.224 \text{ b}$	$1.105 \pm 0.138 \text{ b}$
2.0	$774.667 \pm 53.255 \text{ c}$	$1.068 \pm 0.171 \text{ b}$
对照	$1\ 455.400 \pm 97.902 \text{ a}$	$1.511 \pm 0.342 \text{ a}$

说明：不同小写字母表示达到显著水平($P<0.05$)。



— $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ - - - $1.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$
- · - · $2.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ - - - 对照

图 7 不同磷素水平处理毛竹实生苗植株反射光谱响应特征

Figure 7 Response characteristics of reflectance spectra in different phosphorus level treatments

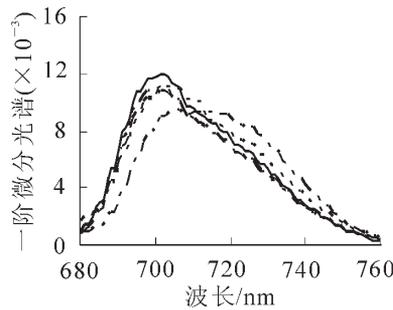


图 8 不同磷素水平处理毛竹实生苗植株一阶微分光谱

Figure 8 First derivative under different phosphorus level treatments

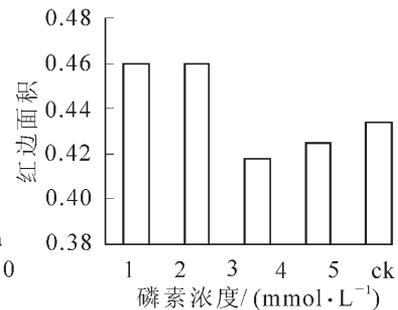


图 9 不同磷素水平处理毛竹实生苗植株红边面积

Figure 9 Summation of the first order derivatives inside red edge in different phosphorus level treatments

2.4 不同钾素浓度梯度筛选

2.4.1 不同钾素浓度梯度对毛竹实生苗叶面积和生物量的影响 由表 5 可知，叶面积表现为先增加后降低的趋势，在钾素浓度为 $1.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的营养液所培养的叶面积最大，达到峰值。最小的是 $2.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理实生苗的叶面积。比较叶面积可知，钾素浓度为 $1.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 配方为较有利于毛竹实生苗叶面积生长发育的钾素浓度配方，而钾素水平为 $2.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最差。生物量的增加同样表现为先增加后降低的趋势。在钾素水平为 $1.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大值，为 $0.933 \text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 。而 $1.0, 0.5, 2.0$ 和 $2.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理依次降低。由此，可以得出钾素水平为 $1.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 为 5 个梯度中较优梯度。

2.4.2 不同钾素浓度梯度对毛竹实生苗光谱特征的影响 比较不同钾素浓度梯度处理下毛竹实生苗的光谱特征(图 10)。光谱反射率随钾素浓度的增加同样表现为先降低后增加的趋势。无论在可见光范围内，还是在近红外区，钾素水平为 $1.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下光谱反射率曲线最接近对照的反射光谱曲线。可见光

范围内峰值处光谱反射率, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 和 2.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理依次为 0.216, 0.164, 0.136, 0.164 和 0.174, 1.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 最小, 较接近土培对照峰值处反射率 0.114。由一阶微分光谱(图 11)可知, 5 个处理的红边位置都没有发生位移, 都处在 702 nm 处, 但红边幅值同样表现为先降低再升高的趋势。可见随着钾素浓度的升高对实生苗的生长表现为先促进后抑制的效果。比较红边面积(图 12), 1.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理最大, 说明该处理下植株生长较优。由光谱特征可知 1.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理较优。综上所述, 钾素浓度 1.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理为较适毛竹实生苗生长的钾素浓度。

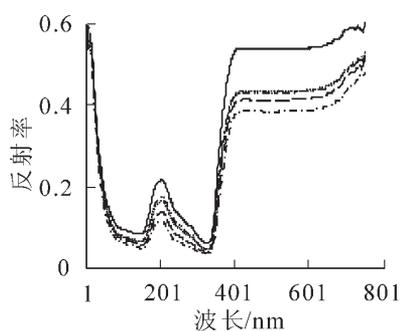


图 10 不同钾素水平处理毛竹实生苗植株反射光谱响应特征

Figure 10 Response characteristics of reflectance spectra in different potassium level treatments

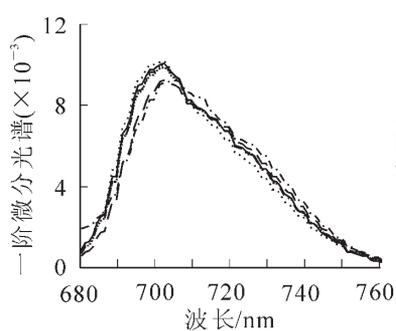


图 11 不同钾素水平处理毛竹实生苗植株一阶微分光谱

Figure 11 First derivative under different potassium level treatments

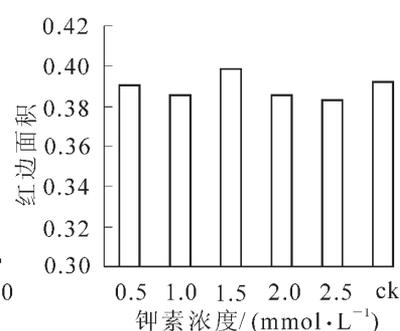


图 12 不同钾素水平处理毛竹实生苗植株红边面积

Figure 12 Summation of the first order derivatives inside red edge in different potassium level treatments

表 5 不同钾素水平处理毛竹实生苗平均叶面积和生物量增加值

Table 5 Average leaf area and increased biomass of moso bamboo seedling in different potassium level treatments

钾素水平/($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	叶面积/ cm^2	生物量/g
0.5	792.586 ± 42.803 bc	0.754 ± 0.119 bc
1.0	718.333 ± 38.749 cd	0.762 ± 0.078 bc
1.5	888.500 ± 51.884 b	0.933 ± 0.066 b
2.0	658.467 ± 39.856 cd	0.584 ± 0.062 c
5.0	638.391 ± 48.446 d	0.500 ± 0.059 c
对照	1 455.400 ± 97.902 a	1.511 ± 0.342 a

说明: 不同小写字母表示达到显著水平 ($P < 0.05$)。

2.5 氮磷钾三因素三水平交互实验

按照 $L_9(3^3)$ 正交设计安排试验, 结果见表 6。以生物量为考察指标, 极差显示各因素主次为 $C > A > B$, $A_3B_1C_2$ 较有利于生物量积累; 以叶面积为考察指标, 极差显示各因素主次亦为 $C > A > B$, $A_3B_1C_2$ 较优。合上述 2 项考察指标, $A_3B_1C_2$ 即氮素浓度为 4.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 磷素浓度为 0.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 钾素浓度为 1.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最有利于毛竹实生苗生物量和叶面积的增加。

3 结论与讨论

通过叶面积、生物量和光谱特征的综合比较, 在 Yoshida 不同比例 4 个处理中, 1/2Yoshida 处理较优于其他的 3 个处理。各个指标都最接近对照的指标。其中生物量的增加达到对照的 97.9%。在氮素、磷素和钾素单因素试验中, 得知氮素浓度 3.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 磷素浓度 1.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理和钾素浓度 1.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理为较优的氮磷钾水平。各个指标都最接近对照的指标。通过氮磷钾交互试验, 我们得知氮素浓度 4.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 磷素浓度 0.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 钾素浓度 1.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 组合最有利于毛竹实生苗生物量和叶面积的增加。

大量研究表明^[22-25], 作物生物量累积、养分吸收等的动态变化对氮素反应较为敏感。杨惠敏等^[26]指出叶片含水量下降的幅度随氮素水平的提高而增大。杨志彬等^[27]指出施氮量对棉株不同果枝部位生物

量累积时空变异特征有显著影响, 施氮过多或不足均不利于棉株生物量的累积。曹翠玲等^[28]研究指出, 氮素水平直接影响冬小麦 *Triticum aestivum* 的生物量和叶面积。氮素水平提高, 干物质质量和叶面积也随之增加; 但是氮素水平过高, 干物质和叶面积不再增加反而降低。这和本试验中发现的结果一致, 随着氮素浓度的升高, 实生苗叶面积、生物量的增加量也随之增大, 当氮素水平超过 $3.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 生物量的累积又有所下降。

张富仓等^[29]指出玉米 *Zea mays* 在磷素水平为 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时生长速率最大, 随着水培液中磷水平的增加, 植株对磷的吸收速率增加, 而利用效率降低。很多研究发现磷素浓度过低, 易出现磷缺乏, 表现缺磷症状; 浓度过高, 会出现磷过量, 表现磷中毒症状^[30-32]。本试验中, 发现随着磷素水平的增加, 植株叶面积和生物量都随之增加, 但当超过 $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时又有所下降, 这和玉米^[29]、水稻 *Oryza sativa*^[33]等研究中的发现一致。

我们在钾素实验时同样发现随着钾素升高生物量先增加后降低这一趋势。这与邵继承等^[34]对水稻幼苗和曹国军等^[35]对春玉米的研究中发现一致。在氮磷钾交互实验中, 得出氮素、磷素、钾素分别为 4.0 , 0.5 和 $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 为较适宜的氮磷钾水平的组合, 和单因素试验的结果不同, 这可能和营养液中各元素间相互作用有关。本研究初步筛选出毛竹实生苗不同氮、磷、钾适宜浓度, 这是毛竹水培体系建立的初步探索。但对于 pH 值、溶解氧和温度等其他影响因素, 有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈辉, 洪伟, 兰斌, 等. 闽北毛竹林的生物量与生产力的研究[J]. 林业科学, 1998, **34** (专辑 1): 60 - 64.
CHEN Hui, HONG Wei, LAN Bin, et al. Study on biomass and productivity of *Phyllostachys heterocycla* var. *pubescens* forest in the north of Fujian [J]. *Sci Silv Sin*, 1998, **34** (supp 1): 60 - 64.
- [2] 金爱武, 傅秋华, 方伟, 等. 毛竹笋用林高效益经营技术及其传播效果分析[J]. 浙江林学院学报, 2003, **20** (3): 254 - 258.
JIN Aiwu, FU Qiuhua, FANG Wei, et al. An analysis of high-benefit management techniques and popularization effects of shoot-bamboo stand [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2003, **20** (3): 254 - 258.
- [3] 张艳璇, 林贤贞, 季洁, 等. 竹刺瘿螨危害毛竹及其生态学的初步研究[J]. 林业科学, 2001, **37** (1): 145 - 148.
ZHANG Yanxuan, LIN Xianzhen, JI Jie, et al. A preliminary study on the infestation and ecology of *Aculus bambusae* Kuan in moso forest [J]. *Sci Silv Sin*, 2001, **37** (1): 145 - 148.
- [4] 张国防, 缪碧华. 毛竹经营管理的研究进展[J]. 福建林学院学报, 2000, **20** (4): 375 - 379.
ZHANG Guofang, LIAO Bihua. A research development of the management on *Phyllostachys heterocycla* cv. *pubescens* [J]. *J Fujian Coll For*, 2000, **20** (4): 375 - 379.
- [5] 马太和. 无土栽培[M]. 北京: 北京出版社, 1980: 47 - 70.
- [6] 连兆煌. 无土栽培原理与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 4 - 10.
- [7] 洪坚平, 谢英荷, 孟会生, 等. 水培油菜营养液养分动态变化研究[J]. 园艺园林科学, 2008, **24** (1): 330 - 334.

表 6 氮磷钾三因素三水平正交试验结果

Table 6 Results of N, P, K three factors and three levels Orthogonal Test

实验号	A	B	C	增加生物量/ (g·株 ⁻¹)	叶面积/ cm ²
1	1	1	1	1.859	1 659.828
2	1	2	2	1.592	1 466.556
3	1	3	3	1.631	1 507.88
4	2	1	2	3.512	1 757.733
5	2	2	3	1.613	1 525.783
6	2	3	1	1.540	1 293.423
7	3	1	3	1.487	1 482.143
8	3	2	1	2.164	1 512.433
9	3	3	2	3.188	1 723.148
生 K1	5.082	6.857	5.564		
物 K2	6.665	5.370	8.292		
量 K3	6.839	6.359	4.731		
R	1.757	1.487	3.562		
叶 K1	4 634.263	4 899.704	4 465.684		
面 K2	4 576.939	4 504.771	4 947.437		
积 K3	4 717.724	4 524.451	4 515.805		
R	140.785	19.680	481.753		

$K = 18.586$

$K = 13928.930$

- HONG Jianpin, XIE Yinhe, MENG Huisheng, *et al.* Nutrient dynamic change of culture solution in hydroponics culture rape [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2008, **24** (1): 330 – 334.
- [8] 查丁石. 不同基质和营养液对茄子的育苗效果[J]. 上海农业学报, 1998, **14** (1): 63 – 66.
ZHA Dingshi. A study on effects of different media and nutrient solutions in raising eggplant seedling [J]. *Acta Agric Shanghai*, 1998, **14** (1): 63 – 66.
- [9] 赵九洲, 陈洁敏, 王奎玲. 代用基质对仙客来幼苗素质的影响[J]. 莱阳农学院学报, 1999, **16** (1): 13 – 15.
ZHAO Jiuzhou, CHEN Jiemin, WANG Kuiling. The effects of different substitute media on the seeding quality of cyclamen [J]. *J Laiyang Agric Coll*, 1999, **16** (1): 13 – 15.
- [10] 唐翔. 营养液盆栽花卉产业化试验[J]. 广西农业科学, 2000 (3): 135 – 138.
TANG Xiang. A study on nutrient solution of potted flower [J]. *Guangxi Agric Sci*, 2000 (3): 135 – 138.
- [11] 伦华文. 901 无土栽培液在花卉栽培中的应用[J]. 热带农业科学, 1998 (6): 68 – 71.
LUN Huawen. The 901 nutrient solution application in the cultivation of flowers [J]. *Chin J Trop Agric*, 1998 (6): 68 – 71.
- [12] 裴孝伯, 李世诚, 张福嫔, 等. 温室黄瓜叶面积计算及其与株高的相关性研究[J]. 中国农学通报, 2005, **21** (8): 80 – 82.
PEI Xiaobo, LI Shicheng, ZHANG Fuman, *et al.* Study on leaf area calculation and its correlation with plant height of cucumber in greenhouse [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2005, **21** (8): 80 – 82.
- [13] 杨京平, 姜宁, 陈杰. 施氮水平对 2 种水稻产量影响的动态模拟及施肥优化分析[J]. 应用生态学报, 2003, **14** (10): 1654 – 1660.
YANG Jingping, JIANG Ning, CHEN Jie. Dynamic simulation of nitrogen application level effect on rice yield and optimization analysis of fertilizer supply in paddy N [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2003, **14** (10): 1654 – 1660.
- [14] LETEY J. Relationship between soil physical properties and crop production [J]. *Adv Soil Sci*, 1985, **1**: 40 – 41.
- [15] DAMISCH W. Biomass yield a topical issue in modern wheat breeding programmes [J]. *Plant Breed*, 1996, **107**: 11 – 17.
- [16] GLTELSON A A, KAUFMAN Y J, STARK R. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction [J]. *Remote Sensing Environ*, 2002, **80**: 76 – 87.
- [17] YOSHIDA S, FORNO D A, COCK J H, *et al.* *Laboratory Manual for Physiological Studies of Rice* [M]. Manila: International Rice Research Institute, 1976: 61 – 64.
- [18] TSAI F, PHILPOT W. Derivative analysis of hyper spectral data [J]. *Remote Sensing Environ*, 1998, **66**: 41 – 51.
- [19] 李向阳, 刘国顺, 杨永锋, 等. 烤烟叶片高光谱参数与多种生理生化指标关系研究[J]. 中国农业科学, 2007, **40** (5): 987 – 994.
LI Xiangyang, LIU Guoshun, YANG Yongfeng, *et al.* Relationship between hyperspectra parameters and physiological and biochemical indexes of flue-cured tobacco leaves [J]. *Scie Agric Sin*, 2007, **40** (5): 987 – 994.
- [20] FILLELLA D, PENUELAS J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content biomass and hydric status [J]. *Int J Remote Sens*, 1994, **15** (7): 1459 – 1470.
- [21] HORLER D N H. The red edge of plant leaf reflectance [J]. *Int J Remote Sens*, 1997, **18** (4): 273 – 288.
- [22] MICHAEL S W, PETER W C, DAVID W, *et al.* Above-ground biomass accumulation and nitrogen fixation of broom (*Cytisus scoparius* L.) growing with juvenile *Pinus radiata* on a dry land site [J]. *For Ecol Manage*, 2003, **184**: 1 – 3.
- [23] 张旺锋, 王振林, 余松烈, 等. 氮肥对新疆高产棉花群体光合性能和产量形成的影响[J]. 作物学报, 2002, **28** (6): 789 – 796.
ZHANG Wangfeng, WANG Zhenlin, YU Songlie, *et al.* Effect of nitrogen on canopy photosynthesis and yield formation in high-yielding cotton of Xinjiang [J]. *Acta Agron Sin*, 2002, **28** (6): 789 – 796.
- [24] 张旺峰, 李蒙春, 勾玲, 等. 北疆高产棉花养分吸收特性的研究[J]. 棉花学报, 1998, **10** (2): 88 – 95.
ZHANG Wangfeng, LI Mengchun, GOU Ling, *et al.* Study on the nutrient absorption characters of cotton with higher productivity in North Xinjiang [J]. *Cotton Sci*, 1998, **10** (2): 88 – 95.
- [25] GAYLER S, WANG E, PRIESACK E, *et al.* Modeling biomass growth, N uptake and phytological development of potato crop [J]. *Geoderma*, 2002, **105**: 367 – 383.
- [26] 杨惠敏, 王根轩. 干旱和 CO₂ 浓度升高对干旱区春小麦气孔密度及分布的影响[J]. 植物生态学报, 2001, **25** (3): 312 –

316.

YANG Huimin, WANG Genxuan. Leaf stomatal densities and distribution in triticum aestivum under drought and CO₂ enrichment [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2001, **25** (3): 312 – 316.

- [27] 杨志彬, 陈兵林, 周治国. 施氮量对花铃期棉花果枝生物量累积时空变异特征的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19** (10): 2215 – 2220.

YANG Zhibin, CHEN Binglin, ZHOU Zhiguo. Effects of nitrogen application rate on spatiotemporal variability of biomass accumulation of cotton's fruiting branch at flower and boll stag [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19** (10): 2215 – 2220.

- [28] 曹翠玲, 李生秀. 氮素水平对冬小麦分蘖期某些含氮化合物及生物量的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2002, **30** (6): 11 – 15.

CAO Cuiling, LI Shengxiu. Influence of nitrogen level on some nitrogenous substance in winter wheat [J]. *J Northwest A & F Univ Nat Sci Ed*, 2002, **30** (6): 11 – 15.

- [29] 张富仓, 康绍忠, 龚道枝, 等. 不同磷浓度对玉米生长及磷、锌吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2005, **16** (5): 903 – 906.

ZHANG Fucang, KANG Shaozhong, GONG Daozhi, *et al.* Maize growth and phosphorous-and zinc uptake under different phosphorous supply level [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, **16** (5): 903 – 906.

- [30] 王聪, 刘曙光, 李志刚, 等. 磷胁迫对不同基因型大豆苗期叶片特征的影响[J]. 内蒙古民族大学学报: 自然科学版, 2004, **19** (3): 303 – 306.

WANG Chong, LIU Shuguang, LI Zhigang, *et al.* Effects of phosphorus stress on the leaf characteristics of different soybean genotypes at seedling stage [J]. *J Inner Mongolia Univ Nat Nat Sci*, 2004, **19** (3): 303 – 306.

- [31] 丁玉川, 陈明昌, 程滨, 等. 不同大豆品种磷吸收利用特性比较研究[J]. 西北植物学报, 2005, **25** (9): 1791 – 1795.

DING Yuchuan, CHEN Mingchang, CHENG Bin, *et al.* Phosphorous uptakes and uses of different soybean varieties [J]. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 2005, **25** (9): 1791 – 1795.

- [32] 吴明才, 肖昌珍, 郑普英. 大豆磷素营养研究[J]. 中国农业科学, 1999, **32** (3): 59 – 64.

WU Mingcai, XIAO Changzhen, ZHENG Puying. Study on the physiological function of phosphorus to soybean [J]. *Sci Agric Sin*, 1999, **32** (3): 59 – 64.

- [33] 郭朝晖, 李合松, 张杨珠, 等. 磷素水平对杂交水稻生长发育和磷素运移的影响[J]. 中国水稻科学, 2002, **16** (2): 151 – 156.

GUO Chaohui, LI Hesong, ZHANG Yangzhu, *et al.* Effects of phosphorus levels on hybrid rice growth and characteristics of phosphorus transportation [J]. *Chin J Rice Sci*, 2002, **16** (2): 151 – 156.

- [34] 邵继承, 杨荣华, 苏雅乐其其格, 等. 钾素水平对水稻幼苗生长发育的影响[J]. 内蒙古民族大学学报: 自然科学版, 2007, **22** (1): 48 – 52.

TAI Jicheng, YANG Ronghua, SU Yaleqiqige, *et al.* The influences of potassium levels on rice growing [J]. *J Inner Mongolia Univ Natl Nat Sci*, 2007, **22** (1): 48 – 52.

- [35] 曹国军, 杜立平, 李刚, 等. 不同钾素营养水平对春玉米碳代谢的影响[J]. 玉米科学, 2008, **16** (4): 46 – 49.

CAO Guojun, DU Liping, LI Gang, *et al.* Effects of different potassium level on carbon metabolism of spring maize [J]. *J Maize Sci*, 2008, **16** (4): 46 – 49.