

DOI: 10.11686/cyxb2024153

http://cyxb.magtech.com.cn

王梦琦, 王菲, 赵琬璐, 等. 不同浓度硅、钙对留兰香幼苗生长和生理特性的影响. 草业学报, 2025, 34(3): 154—163.

WANG Meng-qi, WANG Fei, ZHAO Wan-lu, *et al.* Effects of different concentrations of silicon and calcium on the growth and physiological characteristics of *Mentha spicata* seedlings. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(3): 154—163.

不同浓度硅、钙对留兰香幼苗生长和生理特性的影响

王梦琦, 王菲, 赵琬璐, 刘彦奇, 崔灿, 严俊鑫*

(东北林业大学园林学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要:为探究施用硅和钙对留兰香幼苗生长的影响,设置不同浓度硅(500、1000、2000 mg·kg⁻¹)和钙(400、800、1200 mg·kg⁻¹)处理,测定幼苗生长和生理指标。结果表明:与对照组相比,除2000 mg·kg⁻¹硅外,其他浓度硅、钙处理对留兰香的生长起促进作用,1000 mg·kg⁻¹硅和800 mg·kg⁻¹钙的促进作用较强。硅处理后可溶性糖和可溶性蛋白含量相对对照有所下降,2000 mg·kg⁻¹硅显著提高了脯氨酸含量、过氧化氢酶和过氧化物酶活性,丙二醛含量和细胞膜相对透性相对对照有所增加;多数钙处理后渗透调节物质含量和抗氧化酶活性相对对照均有增加,丙二醛含量和细胞膜相对透性均有降低。主成分和隶属函数分析表明,800和400 mg·kg⁻¹钙、1000 mg·kg⁻¹硅能促进留兰香生长,可为筛选出适宜留兰香生长的硅、钙浓度提供参考。

关键词:留兰香;硅、钙;生长形态;渗透调节物质;抗氧化酶;膜脂过氧化

Effects of different concentrations of silicon and calcium on the growth and physiological characteristics of *Mentha spicata* seedlings

WANG Meng-qi, WANG Fei, ZHAO Wan-lu, LIU Yan-qi, CUI Can, YAN Jun-xin*

Northeast Forestry University, College of Landscape Architecture, Harbin 150040, China

Abstract: In order to investigate the effects of silicon and calcium application on the growth of *Mentha spicata* seedlings, treatments comprising different concentrations of silicon (500, 1000, 2000 mg·kg⁻¹ applied as sodium metasilicate, NaSiO₃·9H₂O) and calcium (400, 800, 1200 mg·kg⁻¹ applied as anhydrous calcium chloride CaCl₂) were set up to determine the growth and physiological parameters of the seedlings. The results showed that, compared with the control group, all concentrations of silicon and calcium treatments, except 2000 mg·kg⁻¹ silicon, promoted the growth of *M. spicata*, with 1000 mg·kg⁻¹ silicon and 800 mg·kg⁻¹ calcium having the strongest promotional effect. Soluble sugar and soluble protein contents decreased after silicon treatment, 2000 mg·kg⁻¹ silicon significantly increased proline content, catalase and peroxidase activity, and malondialdehyde content and cell membrane relative permeability increased compared with the control; most of the calcium treatments increased levels of osmotic regulatory substances and antioxidant enzyme activities compared with the control, while malondialdehyde content and cell membrane relative permeability were decreased. Principal component and subordinate function analyses showed that 800 and 400 mg·kg⁻¹ calcium and 1000 mg·kg⁻¹ silicon promoted the growth of *M. spicata*. These results provide reference data for selecting suitable silicon and calcium concentrations in soil for *M. spicata* growth.

收稿日期:2024-04-30;改回日期:2024-06-20

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(NO. 2572021BK01)资助。

作者简介:王梦琦(2000—),女,山东济宁人,在读硕士。E-mail: mqiw@nefu.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: yanjunxin@163.com

Key words: *Mentha spicata*; silicon, calcium; growth morphology; osmotic regulator; antioxidant enzymes; membrane peroxidation

硅是生物界中对多种动植物生长尤为重要的营养元素,可促进禾本科、硅藻和木贼目等植物的生长。硅在地壳中含量约占27.6%,在土壤中大部分以二氧化硅或硅酸盐形式存在,而能被植物以蒸腾方式吸收运送的单硅酸含量极少($50\sim 250\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[1]。硅参与了植物细胞壁合成,在其过程中形成的“角质—双硅层”细胞^[2]有效增加了植物叶片吸光能力和散射性,减弱了植株气孔蒸腾,最终提高了植物光合产物积累。钙是植物生长和发育的必要元素,在地壳中含量平均为3.25%,可被植物直接利用的水溶性钙含量为几到几百 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[3],在植物体内仅能通过幼嫩根尖以质外体途径吸收。同时,钙离子可以通过维持其光化学阶段的稳定来改善植物的光合作用^[4]。研究表明,过高浓度的钙会抑制网纹甜瓜(*Cucumis melo* var. *reticulatus*)^[5]产量和含糖量的增加;而缺钙则会对拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)^[6]根系的伸长生长产生抑制。

留兰香(*Mentha spicata*)是一种多年生宿根草本植物。留兰香原产于非洲西北部群岛和欧洲南部区域,生于路旁或阴湿地,在我国分布于江苏、安徽、四川、贵州等地^[7]。该植物有一定的耐寒性,一般喜沙壤土,属长日照植物,在土壤潮湿,pH为6.5~7.5时长势良好^[8-10]。留兰香叶片中独特的化学成分使之具有较高的抗菌性^[11]、羟基自由基清除能力及低铁螯合能力^[12],同时因其挥发油中含有较大比例的左旋香芹酮、左旋柠烯,具有较高的提取价值^[13],在日用品、美容用品、生物防治、医药产品研发等方面有广泛应用。留兰香可在城市花坛、庭院、花境中种植,也可在室内作盆栽观赏^[14],另外也可在重金属轻度污染和盐碱地中应用。前人研究结果表明,硅能提高植株抗逆性,改善植物矿质营养,但外源施用硅、钙对留兰香生长和生理特性的影响并不十分清楚,且硅、钙对留兰香产量增加具有一定应用前景,因而本试验通过盆栽培养方式,研究根施不同浓度硅(Si)、钙(Ca)对留兰香生长和生理特性的影响,为筛选出适宜留兰香生长的硅、钙浓度提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

以留兰香为试验材料,母株购买于山西太原秋风香草种植园。采用茎插的方式繁殖幼苗。缓苗25~30 d,然后选出生长旺盛、叶片数量较多、形态整齐的植株作为试验材料。

1.2 方法

本试验于2021年5—9月进行。根据预试验结果,设定3个硅浓度(500 、 1000 、 $2000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和3个钙浓度(400 、 800 、 $1200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),记为 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 ,不加硅和钙处理为对照组(CK),本试验采用的硅源为偏硅酸钠($\text{NaSiO}_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$),钙源为无水氯化钙(CaCl_2)。根据不同浓度的硅、钙处理计算所需药品的用量,将其溶解于800 mL水中,喷洒到基质中,基质为5:1(v:v)的草炭和蛭石。对照组添加不含硅、钙元素的等量蒸馏水。每个花盆装有经过硅、钙处理的基质约450 g,选择生长一致、长势旺盛的幼苗,3株幼苗移栽于一个塑料花盆中。每个处理设置12盆,3个重复。每隔3~5 d浇一次水,保持基质含水量在70%以上。在处理后的第0、20、40、60天对植株的地上部形态参数进行测定,并记录数据,处理60 d后,测定叶片的其他形态和生理指标。

1.3 测定指标

1.3.1 生长指标 株高:使用卷尺测量植株从根茎到茎尖的距离。叶长、叶宽:用游标卡尺测量自茎顶端选取的第3~5片成熟叶。叶面积:自茎顶端取第3~5片成熟叶,展开并拍照,用ImageJ软件测量,各处理均3次重复。地下部形态指标:使用根系扫描仪Epson Expression 11000XL(中国)测定根系总长、根系总面积、根系总体积、根系分叉数和根系平均直径。

1.3.2 生理指标 可溶性糖含量测定参照蒽酮比色法^[15],可溶性蛋白含量测定参照考马斯亮蓝法^[16],脯氨酸含量测定采用茚三酮比色法^[16],超氧化物歧化酶活性测定参照氮蓝四唑(nitroblue tetrazolium, NBT)法^[15],过氧化氢酶活性测定参照紫外分光光度法^[17],过氧化物酶活性测定参照愈创木酚法^[15],丙二醛含量测定参照硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)法^[15],细胞膜透性检测参照刘会超等^[18]的方法。

1.3.3 主成分分析和模糊数学隶属函数法 利用主成分分析法和隶属函数法^[19]对不同浓度硅、钙处理下留兰香幼苗生长和生理指标进行综合评价,计算株高、叶长、根系总面积、根系平均直径、可溶性蛋白、可溶性糖、超氧化物歧化酶活性、过氧化物酶活性、过氧化氢酶活性、丙二醛含量、细胞膜相对透性 11 项指标的隶属函数值,将其平均值作为最终评价指标。当指标值(X)与硅、钙施用效果(μ)呈正相关时,计算公式为:

$$\mu(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

当指标值(X)与硅、钙施用效果(μ)呈负相关时,计算公式为:

$$\mu(X_j) = 1 - (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

式中: $\mu(X_j)$ 代表第 j 个指标的隶属函数值; X_j 代表第 j 个指标值; X_{\min} 代表第 j 个指标的最小值; X_{\max} 代表第 j 个指标的最大值。

1.4 数据分析

通过 Microsoft Excel 2011 软件进行数据录入、整理与计算^[20],数据的方差分析通过 SPSS 26.0 统计软件进行,采用邓肯新复极差法(Duncan test)进行数据的多重比较($P < 0.05$),采用 Sigmaplot 12.5 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 不同浓度硅、钙对留兰香形态生长的影响

2.1.1 不同浓度硅、钙对留兰香株高的影响 如图 1A 所示,20 d 时,各处理株高相比 0 d 时均有增长,比较发现, T_1 、 T_2 、 T_4 、 T_5 处理均显著高于对照组($P < 0.05$)。第 40 天时, T_5 处理株高为此时处理组的最大值,相比对照显著增加, T_1 、 T_2 处理效果仅次于 T_5 ,其他处理相比对照差异不显著,而 T_1 、 T_3 、 T_4 、 T_6 组间差异不显著。第 60 天时, T_5 处理株高仍为此时处理组的最大值, T_2 处理效果仅次于 T_5 ,其他处理相比对照差异不显著,除 T_2 、 T_5 外其他组间无显著差异。

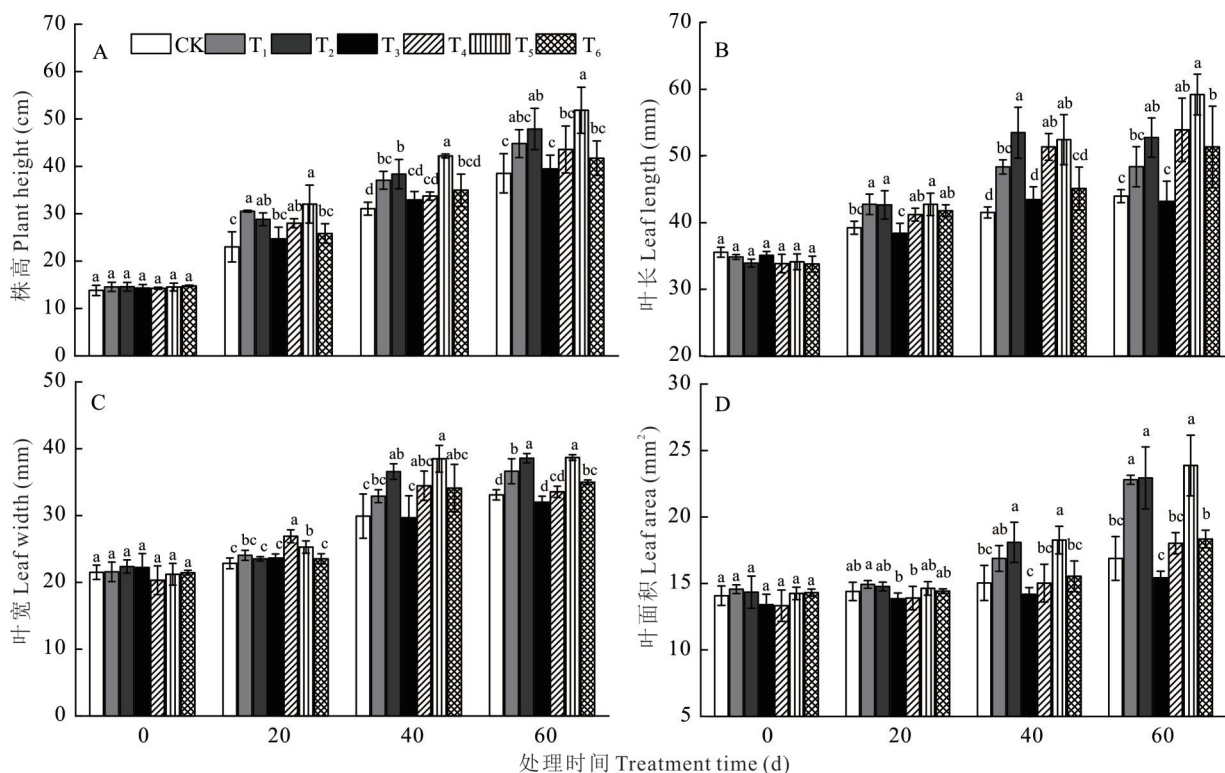


图 1 不同浓度硅、钙对留兰香株高、叶长、叶宽、叶面积的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of silicon and calcium on plant height, leaf length, leaf width and leaf area of *M. spicata* 不同字母表示同一时间不同浓度硅、钙处理间差异显著($P < 0.05$)。Different letters indicate significant differences among different concentrations of silicon and calcium treatments at the same time ($P < 0.05$).

2.1.2 不同浓度硅、钙对留兰香叶长的影响 如图 1B 所示,20 d 时, T_1 、 T_2 、 T_5 处理叶长与对照相比均显著增加 ($P < 0.05$)。40 d 时,各处理间幼苗叶长有显著差异, T_1 、 T_2 、 T_4 、 T_5 处理比对照显著增加了 14.50%~32.82% ($P < 0.05$), T_2 处理叶长为最大值。40~60 d 时,各处理叶长均有不同程度的增长,60 d 时, T_5 处理叶长为此时处理组的最大值,除 T_1 、 T_3 外,各处理叶长显著高于对照 ($P < 0.05$)。

2.1.3 不同浓度硅、钙对留兰香叶宽的影响 如图 1C 所示,0~20 d 各处理叶宽增长缓慢,20 d 时 T_4 处理为最高值。40 d 时, T_1 、 T_4 、 T_5 、 T_6 处理后叶宽有较大程度增加,其中 T_5 的增长幅度最大, T_2 、 T_5 处理相比对照显著增加 ($P < 0.05$), T_3 处理幼苗叶宽相比对照有所降低。40~60 d,各处理幼苗叶宽增加效果不明显,60 d 时 T_5 处理仍为试验组中最高值,仅 T_1 、 T_2 、 T_5 、 T_6 处理与对照有显著差异 ($P < 0.05$), T_2 、 T_5 组间差异不显著。

2.1.4 不同浓度硅、钙对留兰香叶面积的影响 如图 1D 所示,0~20 d 各组叶面积变化不大。40 d 时,各组叶面积均有所升高, T_2 、 T_5 处理相比对照显著升高 ($P < 0.05$),此时 T_5 处理叶面积最大,其他处理与对照相比无显著差异。60 d 时,对照组和 T_3 处理叶面积有所增加, T_5 处理仍为最大值, T_1 、 T_2 、 T_5 处理与对照组相比差异显著 ($P < 0.05$)。

2.1.5 不同浓度硅、钙对留兰香根形态的影响 由表 1 可知,与对照相比, T_1 处理后根系总长无显著变化,根系总面积、总体积、分叉数、平均直径显著增加。 T_2 处理对幼苗根系总面积和根系平均直径增加效果较为显著 ($P < 0.05$)。 T_3 处理下,与对照相比,根系总长和总体积有所降低,但无显著差异,仅根系分叉数显著增加。不同浓度钙处理后,各根系指标随着钙浓度的增加呈先升后降的趋势, T_4 处理后除根系总体积外,各根系形态指标均显著增加。 T_5 处理对各根系形态指标的影响最大,达到对照组的 2.81~4.79 倍。 T_6 处理下根系总体积和根系平均直径相比对照差异不显著。

表 1 不同浓度硅、钙对留兰香根形态的影响

Table 1 Effects of different concentrations of silicon and calcium on the morphology of the roots of *M. spicata*

处理 Treatment	根系总长 Total length of root system (cm)	根系总面积 Total root area (cm ²)	根系总体积 Total volume of root system (cm ³)	根系分叉数 Number of root forks (No.)	根系平均直径 Roots average diameter (mm)
CK	414.33±21.02d	7.47±0.77e	0.56±0.15de	206.00±39.73e	0.29±0.03d
T_1	446.65±5.10d	11.45±0.50c	1.10±0.09c	379.33±45.54c	0.45±0.03c
T_2	757.52±28.44b	24.19±0.47b	1.95±0.24b	591.00±38.15b	1.13±0.10b
T_3	406.64±15.84d	9.86±0.74d	0.34±0.02e	298.00±16.82d	0.32±0.04d
T_4	1127.40±44.27a	23.70±0.97b	0.83±0.07cd	530.67±38.68b	1.09±0.05b
T_5	1163.84±20.16a	26.94±0.85a	2.68±0.31a	737.00±60.32a	1.34±0.03a
T_6	466.09±42.26c	12.69±0.63c	0.73±0.07d	562.33±30.92b	0.34±0.05d

同列不同字母代表同一指标不同浓度硅、钙处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Different letters in the same column meant significant differences among treatments with different concentrations of silicon and calcium for the same index ($P < 0.05$). 下同 The same below.

2.2 不同浓度硅、钙对留兰香生理特性的影响

2.2.1 不同浓度硅、钙对留兰香渗透调节物质含量的影响 由表 2 可知,与对照相比,不同浓度硅处理后,可溶性糖、可溶性蛋白含量均不同程度地降低,随着硅浓度增加呈先升后降的趋势,脯氨酸含量呈先降后升的趋势。 T_1 处理后,可溶性糖、脯氨酸含量相比对照显著降低 ($P < 0.05$)。 T_2 处理时仅脯氨酸含量显著降低。 T_3 处理后,可溶性糖、可溶性蛋白含量显著降低,脯氨酸含量显著增加 ($P < 0.05$)。 T_4 ~ T_6 处理下,可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量均随着钙浓度的增加呈先降后升的趋势, T_4 处理下,可溶性糖、可溶性蛋白含量显著增加,脯氨酸含量显著降低。 T_5 处理下,可溶性糖含量与对照相比差异不显著,但显著低于 T_4 、 T_6 处理 ($P < 0.05$),脯氨酸含量组间差异不显著。 T_6 处理下可溶性糖含量显著增加 ($P < 0.05$),可溶性蛋白含量无显著变化,脯氨酸含量显著降低。

2.2.2 不同浓度硅、钙对留兰香抗氧化酶活性的影响 由表3可知,硅处理中,叶片的过氧化氢酶(catalase, CAT)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性随硅浓度的升高呈先降后升的趋势。与对照相比, T_1 、 T_2 处理后,叶片POD、SOD活性显著降低($P < 0.05$),CAT活性无显著差异。 T_3 处理下,叶片CAT、POD活性显著增加($P < 0.05$),SOD活性与对照相比无显著差异。在钙处理中,CAT和SOD活性先增加后减少,POD活性只增不减。 T_4 处理CAT、SOD活性高于对照组。 T_5 处理极大程度增加了CAT、POD活性。 T_6 处理留兰香叶片POD活性大幅上升,CAT活性显著降低。

2.2.3 不同浓度硅、钙对留兰香膜脂过氧化的影响 如表4所示, T_1 处理后丙二醛(malonaldehyde, MDA)含量低于对照组但无显著差异,细胞膜相对透性显著降低($P < 0.05$)。 T_2 处理后叶片膜脂过氧化指标显著低于CK($P < 0.05$)。 T_3 处理后,叶片MDA含量和细胞膜相对透性均高于对照,说明高浓度的硅离子会导致细胞膜相对透性增大,加剧细胞过氧化水平。与对照相比, T_4 处理后,MDA含量显著增加($P < 0.05$),细胞膜相对透性显著降低($P < 0.05$), T_5 处理后MDA含量、细胞膜相对透性显著降低($P < 0.05$), T_6 处理后MDA含量、细胞膜相对透性与对照组差异不显著,但与 T_4 、 T_5 组间差异显著($P < 0.05$)。

2.3 不同浓度硅、钙对留兰香生长和生理指标的主成分和隶属函数分析

对留兰香17个生长、生理指标进行主成分分析,结果见表5,前4个主成分的贡献率分别为54.20%、19.55%、13.45%、10.93%,累积贡献率达98.13%,说明可利用这4个指标对留兰香生长进行综合评价。第1主成分特征值为9.214,对应株高、叶长、根系总面积、根系平均直径4个正向值较大,第2主成分特征值为3.323,对应可溶性糖、可溶性蛋白、SOD活性、丙二醛含量4个特征向量较大,第3主成分特征值为2.287,CAT活性、细胞膜相对透性正向值较大,第4主成分特征值为1.858,POD活性正向值较大。较大的特征向量极大程度上能代表对综合指标的贡献,因此选取这11个指标进行隶属函数分析。

通过模糊数学隶属函数法对留兰香生长、生理指标进行综合评价。由表6可知,根据隶属函数平均值

表2 不同浓度硅、钙对留兰香渗透调节物质含量的影响

Table 2 Effect of different concentrations of silicon and calcium on the content of osmoregulatory substances in *M. spicata*

处理 Treatment	可溶性糖 Soluble sugar ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	可溶性蛋白 Soluble protein ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	脯氨酸 Proline ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)
CK	0.80±0.07b	117.69±8.17bc	459.40±54.13b
T_1	0.58±0.07c	102.87±8.81cd	364.13±77.54c
T_2	0.74±0.17b	105.47±4.57cd	323.31±36.54c
T_3	0.35±0.10c	88.61±8.27d	618.99±16.17a
T_4	1.42±0.17a	177.29±3.58a	355.28±26.02c
T_5	0.82±0.27b	121.98±12.07bc	289.02±66.41c
T_6	1.48±0.32a	133.21±21.40b	368.80±49.54c

表3 不同浓度硅、钙对留兰香抗氧化酶活性的影响

Table 3 Effects of different concentrations of silicon and calcium on the antioxidant enzyme activities of *M. spicata* ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)

处理 Treatment	过氧化氢酶 Catalase (CAT)	过氧化物酶 Peroxidase (POD)	超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase (SOD)
CK	36.99±3.18d	139.87±5.79d	33.02±2.99c
T_1	33.09±1.77de	70.90±5.95f	22.03±4.69d
T_2	34.12±3.45de	67.51±10.21f	23.55±5.58d
T_3	68.73±2.69a	174.47±16.90c	41.67±5.77bc
T_4	45.39±3.90c	101.43±1.98e	50.65±5.54ab
T_5	59.14±1.14b	247.99±18.62b	53.47±7.63a
T_6	30.93±0.30e	380.99±23.11a	40.34±1.05c

表4 不同浓度硅、钙对留兰香膜脂过氧化的影响

Table 4 Effects of different concentrations of silicon and calcium on membrane lipid peroxidation of *M. spicata*

处理 Treatment	丙二醛含量 Malondialdehyde content ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)	细胞膜相对透性 Relative permeability of cell membrane (%)
CK	3.57±0.44bc	16.13±1.60b
T_1	2.72±0.50cd	9.48±0.73cd
T_2	2.53±0.45d	8.07±0.18d
T_3	4.01±0.30b	21.74±3.60a
T_4	5.40±0.90a	8.46±1.08d
T_5	1.47±0.51e	12.24±2.73c
T_6	2.84±0.09cd	18.30±1.25b

大小,7个硅、钙处理综合生长能力排序为:800 mg·kg⁻¹Ca>400 mg·kg⁻¹ Ca>1000 mg·kg⁻¹Si>1200 mg·kg⁻¹ Ca>500 mg·kg⁻¹ Si>CK>2000 mg·kg⁻¹ Si。

表 5 留兰香幼苗生长、生理指标主成分分析

Table 5 Principle component analysis of growth and physiological indicators of *M. spicata* seedlings

指标 Index	成分 1 Component 1	成分 2 Component 2	成分 3 Component 3	成分 4 Component 4
株高 Plant height	0.956	-0.230	0.163	-0.044
叶长 Leaf length	0.968	0.184	0.049	0.095
叶宽 Leaf width	0.872	-0.475	0.028	0.094
叶面积 Leaf area	0.887	-0.402	-0.095	0.131
可溶性糖 Soluble sugar	0.277	0.726	-0.425	0.458
可溶性蛋白 Soluble protein	0.333	0.838	-0.414	0.002
脯氨酸 Proline	-0.891	0.025	0.367	-0.239
超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity	0.238	0.796	0.526	0.000
过氧化物酶活性 Peroxidase activity	-0.014	0.347	0.420	0.838
过氧化氢酶活性 Catalase activity	-0.080	0.222	0.863	-0.435
丙二醛含量 Malondialdehyde content	-0.480	0.647	-0.336	-0.467
细胞膜相对透性 Relative permeability of cell membrane	-0.716	0.128	0.575	0.363
根系总长 Total length of root system	0.828	0.448	0.109	-0.306
根系总面积 Total root area	0.921	0.211	0.084	-0.237
根系总体积 Total volume of root system	0.913	-0.291	0.246	-0.006
根系分叉数 Number of root forks	0.910	0.171	0.175	0.227
根系平均直径 Roots average diameter	0.914	0.148	0.095	-0.333
特征值 Eigenvalue	9.214	3.323	2.287	1.858
贡献率 Contribution rate (%)	54.201	19.547	13.451	10.930
累积贡献率 Accumulative contribution rate (%)	54.201	73.748	87.199	98.129

表 6 留兰香幼苗生长及生理指标综合评价

Table 6 Comprehensive evaluation of growth and physiological indexes of *M. spicata* seedlings

处理 Treat- ment	隶属函数值 Subordinate function value											隶属平 均值 Subordi- nate aver- age value	排序 Sort
	株高 Plant height	叶长 Leaf length	根系总 面积 Total root area	根系平均 直径 average di- ameter	可溶性 蛋白 Soluble protein	可溶性 糖 Sol- uble sugar	超氧化物歧 化酶活性 Su- peroxide dis- mutase activity	过氧化物 酶活性 Peroxidase activity	过氧化氢 酶活性 Catalase activity	丙二醛含量 Malondial- dehyde con- tent	细胞膜相对透性 Relative permea- bility of cell membrane		
CK	0.000	0.004	0.000	0.000	0.328	0.398	0.350	0.231	0.160	0.466	0.410	0.213	6
T ₁	0.451	0.397	0.204	0.152	0.161	0.204	0.000	0.011	0.057	0.682	0.897	0.292	5
T ₂	0.684	0.598	0.859	0.800	0.190	0.345	0.048	0.000	0.084	0.730	1.000	0.489	3
T ₃	0.003	0.000	0.123	0.029	0.000	0.000	0.625	0.341	1.000	0.000	0.000	0.193	7
T ₄	0.347	0.675	0.834	0.762	1.000	0.947	0.910	0.108	0.383	0.354	0.971	0.720	2
T ₅	1.000	1.000	1.000	1.000	0.376	0.416	1.000	0.576	0.746	1.000	0.695	0.801	1
T ₆	0.201	0.487	0.268	0.048	0.503	1.000	0.582	1.000	0.000	0.651	0.252	0.454	4

3 讨论

3.1 不同浓度硅、钙对留兰香地上和地下部形态生长的影响

根、茎、叶的生长量变化一定程度上被认为是反映植物生长及抗胁迫能力好坏的重要依据,同时也能间接反映该环境的适宜程度。研究发现在40 d后植株各形态指标均呈上升趋势,并在60 d时达到最大值,这可能是因为留兰香生长初期主要依赖母株的营养供应,对外部养分需求低造成的。这与刘景凯等^[21]对水培大蒜(*Allium sativum*)的研究得出大蒜生长初期对营养液中的养分反应并不敏感的结论类似。外源施硅可增加植物表皮细胞壁中角质双硅层厚度,加大叶片对散射光透过量,减少蒸腾失水,促进植物生长^[2]。分析不同浓度施硅处理发现,硅浓度为500、1000 mg·kg⁻¹时对地上和地下形态指标增加效果较好,而硅浓度为2000 mg·kg⁻¹时则对株高、叶长、叶宽及叶面积产生明显抑制现象,这与何淑平等^[22]对四棱豆(*Psophocarpus tetragonolobus*)的研究结果相一致,推测与本试验中以NaSiO₃·9H₂O形式施加过高浓度硅有关,土壤中积累过量钠离子损伤土壤结构,产生盐害环境,破坏植株根系,影响地上部生长。而高浓度硅对根系总长、根系总体积降低幅度较小,说明留兰香地上部形态对高硅浓度的响应更直接、更迅速。

钙在维持细胞结构稳定,促进植物分生组织生长方面起重要作用,同时还可通过信使功能对植物生理生化过程进行间接调控,是植物生长发育必需的营养元素之一。但研究发现土壤中的钙离子浓度发生变化时,不同植物的生长变化规律也不同。本试验中,外源施加400、800、1200 mg·kg⁻¹浓度钙,可以在不同程度上提高留兰香的地上和地下部形态特征。60 d时,与对照相比,3种浓度钙处理后的幼苗地上部形态指标显著增加,其中800 mg·kg⁻¹浓度钙处理增长幅度最大。这与前人研究结果不尽相同,彭博等^[23]在钙胁迫对狭叶香蒲(*Typha angustifolia*)的影响中发现,1500 mg·kg⁻¹钙浓度条件下,狭叶香蒲株高、叶面积相比其他处理出现明显降低,吴小南等^[24]在钙对蓝莓(*Vaccinium* spp.)幼苗影响中发现,高浓度钙导致蓝莓基茎、叶片含水率、地上生物量和总生物量显著减小。这可能是因为植物种类不同,生长指标的变化也不同。但也有研究得出与本试验相似的结论,黄远博^[25]研究得出提高钙的浓度可以促进无花果(*Ficus carica*)的生长,当钙浓度为160 mg·kg⁻¹时效果最佳。喜钙植物指当土壤中含钙量较高时才能正常生长,较少生长于酸性土壤的一类植物^[26],而外源施加高浓度(400、800、1200 mg·kg⁻¹)的钙后能促进留兰香分生组织生长,影响木质素含量,对其生长有合理的增加趋势,因此推断留兰香为喜钙植物。同样对地下部形态根系总长、根系总面积、根系分叉数的增加幅度较大,结果表明钙元素与根系生长发育密切相关,能促进根系细胞壁的生长,一定程度上增强根系活力^[27]。

3.2 不同浓度硅、钙对留兰香生理特性的影响

大量研究表明,不同环境条件下植物会通过自身一系列生理生化调节适应环境。本试验数据显示,500、1000 mg·kg⁻¹硅处理后可溶性糖(soluble sugar, SS)、可溶性蛋白(soluble protein, SP)、脯氨酸(proline, Pro)含量均有明显降低,这与李红杰^[28]对芹菜(*Apium graveolens*)幼苗、毛金梅等^[29]对嵩柳(*Salix viminalis*)的研究结果不同,郭树勋等^[30]研究推测此现象是由于施硅后植物细胞壁强度和韧性提高,细胞内外渗透压得到有效平衡,从而减弱了渗透调节物质上升诱导信号表达。SS、SP是植物细胞所需的氮、碳来源,同时植物可通过累积渗透调节物质来抵御逆境,2000 mg·kg⁻¹硅显著降低了SS、SP含量,显著增加了Pro含量,其原因可能是施硅浓度过高导致盐害,植物通过渗透调节物质积累来缓解胁迫损伤。SOD能催化O⁻²发生歧化反应,可与CAT、POD产生协同作用,清除过量自由基。吴森等^[31]研究表明在干旱胁迫下,施用硅肥可以提高紫花苜蓿(*Medicago sativa* 'Sadie7')POD、SOD、CAT活性,降低MDA含量,在一定程度上提高紫花苜蓿的抗旱性。徐芬芬^[32]研究发现,铬胁迫下叶面喷施硅酸钾可明显提高西兰花(*Brassica oleracea* var. *italica*)SOD、POD活性,缓解铬对西兰花幼苗的毒害。与上述研究结果不同,本试验发现2000 mg·kg⁻¹硅处理后3种抗氧化酶活性有升高现象。这是因为高浓度的硅处理后,留兰香叶片产生了胁迫,为维持活性氧的稳定,SOD、CAT、POD这3种酶活性均升高。同时在高浓度硅条件下,叶片MDA含量和细胞膜透性都有增加,这与刘钰等^[33]对甜菜(*Beta vulgaris*)的研究结论相似,进一步说明了高浓度硅加剧了留兰香叶片的膜脂过氧化和膜系统伤害程度,使植物加快衰老。

有研究表明,钙离子与蛋白质合成有一定相关性,缺钙会降低RNA和蛋白质合成能力,从而减少蛋白质合成

量^[34]。杜强^[35]证实增施适当水平钙肥可增加马铃薯(*Solanum tuberosum*)植株叶片SP含量,降低MDA含量,延缓叶片衰老。本试验结果显示,在不同浓度钙处理后留兰香叶片SP、SS含量明显升高,而Pro含量低于对照,这表明施加外源钙有利于植物渗透调节物质积累,从而为植物提供充足的氮源和碳源,有利于植物生长。研究发现钙具有提高抗氧化酶活性、清除自由基,减少积累活性氧的能力。贾蕊^[36]研究发现在低钙营养溶液条件下,百合(*Lilium spp.*)叶片MDA含量降低,抗氧化酶活性也均显著高于对照和高钙处理。本试验数据表明,在外源钙处理下,随钙浓度的升高,CAT和SOD活性先增后降,POD活性只增无减,且与对照相比显著增加,钙浓度为800 mg·kg⁻¹时增加幅度最大,MDA含量和细胞膜透性均明显降低。推测造成该现象的原因为适宜浓度的钙可通过结合膜表面的磷酸盐、蛋白质羟基、磷酸酯提高抗氧化酶活性。但也有研究表明,高浓度钙环境不利于沙地樟子松(*Pinus sylvestris var. mongolica*)^[37]、人参(*Panax ginseng*)^[38]等植物生长,打破了活性氧代谢平衡,抗氧化酶系统紊乱,MDA含量上升,甚至对植物产生毒害,降低其抗逆能力。这可能是不同类型的植物对钙浓度的适应性不同,导致生理指标的变化也不同。

4 结论

在盆栽土培条件下,通过外施不同浓度硅、钙可有效改善留兰香幼苗的生长特性,且施用硅、钙在不同浓度下,留兰香幼苗生长和生理特性也有所差异。通过主成分和隶属函数分析,钙浓度为800和400 mg·kg⁻¹和硅浓度为1000 mg·kg⁻¹处理可促进留兰香的生长,过高浓度硅(2000 mg·kg⁻¹)抑制留兰香的生长。根据留兰香生长及生理指标的变化规律,筛选出适宜的硅浓度为1000 mg·kg⁻¹,钙浓度为800 mg·kg⁻¹。

参考文献 References:

- [1] Alok R, Ragini S, Meenu B, *et al.* Silicon—mediated abiotic and biotic stress mitigation in plants: Underlying mechanisms and potential for stress resilient agriculture. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 163: 15—25.
- [2] Ma C H, Yang L, Hu S Y. Silicon supplying ability of soil and advances of silicon fertilizer research. *Hubei Agricultural Sciences*, 2009, 48(4): 987—989.
马朝红, 杨利, 胡时友. 土壤供硅能力与硅肥应用研究进展. *湖北农业科学*, 2009, 48(4): 987—989.
- [3] Soil and Fertilizer Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences. *Chinese fertilizers*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1994.
中国农业科学院土壤肥料研究所. *中国肥料*. 上海: 上海科学技术出版社, 1994.
- [4] Chen D W, Tang Y H, Shi W B, *et al.* Progress in the regulation of calcium growth and development. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(11): 3593—3601.
陈德伟, 汤寓涵, 石文波, 等. 钙调控植物生长发育的进展分析. *分子植物育种*, 2019, 17(11): 3593—3601.
- [5] Tang X F, Long M H, Yu W J, *et al.* The yield and quality of melon as influenced by different levels of potassium, calcium, and magnesium. *Northern Horticulture*, 2008(4): 17—20.
唐小付, 龙明华, 于文进, 等. 不同钾、钙、镁水平对厚皮甜瓜产量和品质的影响. *北方园艺*, 2008(4): 17—20.
- [6] Gruber B D, Giehl R F H, Friedel S, *et al.* Plasticity of the *Arabidopsis* root system under nutrient deficiencies. *Plant Physiology*, 2013, 163(1): 161—179.
- [7] Hao R F. *Quality evaluation of spearmint at different harvesting periods and study on the bioactivity and application of its extracts*. Nanjing: Nanjing Normal University, 2017.
郝瑞芬. 不同采收期留兰香品质评价及其提取物生物活性与应用研究. 南京: 南京师范大学, 2017.
- [8] Jiang R, Wu W. Characteristics and cultivation techniques of *Mentha spicata*. *Rural Science & Technology*, 2012(6): 58—59.
江蓉, 吴伟. 留兰香特性及栽培技术. *农村科技*, 2012(6): 58—59.
- [9] Ding X M. *Cultivation and initial processing techniques of Mentha spicata*. *Xinjiang Agricultural Science and Technology*, 2015(6): 31—32.
丁雪梅. 留兰香的栽培与初加工技术. *新疆农业科技*, 2015(6): 31—32.
- [10] Guo F R, Nie J Y, Sun W, *et al.* Key points of cultivation techniques for *Mentha spicata* in Northeast China. *Special Economic Animals and Plants*, 2010, 13(10): 36.
郭凤仁, 聂俊颖, 孙伟, 等. 东北地区留兰香栽培技术要点. *特种经济动植物*, 2010, 13(10): 36.

- [11] Zhang Y. Measure of chemical composition and antimicrobial activity, antioxidant activity, anti-tumor properties of spearmint oil. *Shanghai Measurement and Testing*, 2019, 46(5): 50–54.
张曜. 留兰香油的化学组成及其抗氧化、抗菌性能的测定. *上海计量测试*, 2019, 46(5): 50–54.
- [12] Kanatt R S, Chander R, Sharma A, *et al.* Antioxidant potential of mint (*Mentha spicata* L.) in radiation-processed lamb meat. *Food Chemistry*, 2007, 100(2): 451–458.
- [13] Zheng J, Zhao D S, Wu B, *et al.* A study on chemical constituents in the herb of *Mentha spicata*. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2002(10): 32–34.
郑健, 赵东升, 吴斌, 等. 留兰香中化学成分的分离与鉴定. *中国中药杂志*, 2002(10): 32–34.
- [14] Jiang X W. Aromatic plants and their landscape construction methods. *Landscape Architecture Academic Journal*, 2017(8): 22–25.
蒋细旺. 芳香植物及其景观营造方式. *园林*, 2017(8): 22–25.
- [15] Zou Q. Experimental guidance on plant physiology. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 112–141.
邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2000: 112–141.
- [16] Zhang X M, Liu Z H, Guo M, *et al.* Effects of biochar on seed germination and seedling growth of two plants. *Journal of Northeast Forestry University*, 2023, 51(4): 26–31, 49.
章小勉, 刘梓毫, 郭猛, 等. 生物炭对两种植物种子萌发和幼苗生长的影响. *东北林业大学学报*, 2023, 51(4): 26–31, 49.
- [17] Gao J F. Experimental guidance on plant physiology. Beijing: Higher Education Press, 2006.
高俊凤. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [18] Liu H C, Jia W Q. Study on some physiological characteristics of *Trifolium repens* leaves under salt stress. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2008(12): 58–60.
刘会超, 贾文庆. 盐胁迫对白三叶幼苗叶片叶绿素含量和细胞膜透性的影响. *广东农业科学*, 2008(12): 58–60.
- [19] Zhang Y J, Shang Y S, Wang P C, *et al.* Effects of super absorbent polymers on growth and physiological characteristics of *Sophora davidii* vs. Panjiang seedlings under drought stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(7): 90–98.
张宇君, 尚以顺, 王普昶, 等. 干旱胁迫下保水剂对盘江白刺花幼苗生长和生理特性的影响. *草业学报*, 2020, 29(7): 90–98.
- [20] Lv Y R, Wang F, Zhang T T, *et al.* Effect of inoculation with AM fungi on *Rosa rugosa* ‘Zizhi’ responses to *Lymantria dispar* stress. *Journal of Northeast Forestry University*, 2022, 50(12): 99–103.
吕亚茹, 王菲, 张婷婷, 等. 接种AM真菌对紫枝玫瑰应答舞毒蛾胁迫的影响. *东北林业大学学报*, 2022, 50(12): 99–103.
- [21] Liu J K, Liu S Q, Lian H F, *et al.* Effects of silicon in nutrient solution on garlic growth and its physiological characteristics. *China Vegetables*, 2014(3): 33–37.
刘景凯, 刘世琦, 连海峰, 等. 硅对水培大蒜生长和生理特性的影响. *中国蔬菜*, 2014(3): 33–37.
- [22] He S P, Jin Y Z, Wang P. Effects of silicon on biomass and physiological properties of winged bean seedling under drought stress. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2): 263–266, 298.
何淑平, 靳亚忠, 王鹏. 硅对于干旱胁迫下四棱豆幼苗生物量和生理特性的影响. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 263–266, 298.
- [23] Peng B, Xu M Z, Wang Y, *et al.* Effects of calcium stress on growth and physiological index of *Typha angustifolia* L. in karst wetland. *Journal of West China Forestry Science*, 2020, 49(4): 163–170.
彭博, 徐鸣洲, 王妍, 等. 钙胁迫对狭叶香蒲的生长及逆境生理指标的影响. *西部林业科学*, 2020, 49(4): 163–170.
- [24] Wu X N, Wang H X, Wang D, *et al.* Effect of calcium application on growth and physiological property of blueberry cutting seedlings. *Journal of Fruit Science*, 2022, 39(6): 1063–1071.
吴小南, 王贺新, 王碟, 等. 钙对蓝莓幼苗生长及生理特性的影响. *果树学报*, 2022, 39(6): 1063–1071.
- [25] Huang Y B. Effects of calcium on the growth and physiological characteristics of fig. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
黄远博. 钙对无花果生长与生理特性的影响. 南京: 南京农业大学, 2019.
- [26] Fu R, Meng X X, Chai S F. Research progress on the relationship between plants and calcium environment. *Northern Horticulture*, 2019(3): 161–166.
付嵘, 孟小暇, 柴胜丰. 植物与钙环境关系的研究进展. *北方园艺*, 2019(3): 161–166.
- [27] Wang F. Effects of different concentrations of silicon and calcium on growth and physiological characteristics of *Mentha spicata*.

Harbin: Northeast Forestry University, 2022.

王菲. 不同浓度硅、钙处理对留兰香(*Mentha spicata*)生长及生理特性的影响. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.

- [28] Li H J. Effects of exogenous melatonin and silicon on the growth and physiological characteristics of celery (*Apium graveolens*) seedlings under salt stress. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2020, 49(1): 96–102.
李红杰. 外源褪黑素和硅对盐胁迫下芹菜幼苗生长及生理特性的影响. *河南农业科学*, 2020, 49(1): 96–102.
- [29] Mao J M, Zhai F F, Liu J X, *et al.* The regulation of silicon to lead stress in *Salix viminalis*. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(2): 60–67.
毛金梅, 翟飞飞, 刘俊祥, 等. 硅对蒿柳铅胁迫的调控. *林业科学*, 2018, 54(2): 60–67.
- [30] Guo S X, Yang R, Hu X H, *et al.* Effects of exogenous silicon on the growth and physiological characteristics of tomato seedlings under different low temperature stress. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2021, 41(4): 50–57.
郭树勋, 杨然, 胡晓辉, 等. 外源硅对不同低温胁迫下番茄根系生长及生理特性的影响. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(4): 50–57.
- [31] Wu M, Liu X B, Ding L R, *et al.* Effects of silicon on germination and physiological characteristics of alfalfa under drought stress simulated by PEG. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(6): 1258–1264.
吴森, 刘信宝, 丁立人, 等. PEG模拟干旱胁迫下硅对紫花苜蓿萌发及生理特性的影响. *草地学报*, 2017, 25(6): 1258–1264.
- [32] Xu F F. Effects of Si on the growth and physiological characters of broccoli seedlings under the chromium stress. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2014, 39(6): 55–57.
徐芬芬. 铬胁迫下施硅对西兰花生长和生理特性的影响. *吉林农业科学*, 2014, 39(6): 55–57.
- [33] Liu Y, Fan G K, Liu D Y, *et al.* Effect of sodium silicate on the morphology and physiological and biochemical characteristics of sugar beet. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(5): 124–133.
刘钰, 范国凯, 刘丹阳, 等. 硅酸钠对苗期甜菜形态和生理生化特性影响的研究. *中国土壤与肥料*, 2022(5): 124–133.
- [34] Gao X Y, Yang G P, Xu Z Q, *et al.* The effect of calcium on the protective enzyme system of soybean membrane lipid peroxidation under water stress. *Journal of South China Agricultural University*, 1999(2): 7–12.
高向阳, 杨根平, 许志强, 等. 水分胁迫下钙对大豆膜脂过氧化保护酶系统的影响. *华南农业大学学报*, 1999(2): 7–12.
- [35] Du Q. Effects of calcium on plant growth and tuber quality of potato. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013.
杜强. 钙对马铃薯植株生长及块茎品质的影响. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- [36] Jia R. Morphological and physiological effects of different calcium treatments on leaf scorch of potted oriental lily. Nanning: Guangxi University, 2017.
贾蕊. 不同钙处理对盆栽东方百合叶烧病发生的形态和生理影响. 南宁: 广西大学, 2017.
- [37] Li X J, Zhang G Q, Li H, *et al.* Effects of exogenous calcium on the growth and physiological characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings in sandy land. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(5): 1095–1103.
李香君, 张广岐, 李慧, 等. 外源钙对沙地樟子松幼苗生长及生理特性的影响. *土壤通报*, 2021, 52(5): 1095–1103.
- [38] Yang Z, Sun H, Li T Y, *et al.* Effects of calcium on some biological and physiological characters of *Panax ginseng*. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2014, 36(6): 674–679.
杨振, 孙海, 李腾懿, 等. 钙对人参某些生物学性状和生理指标的影响. *吉林农业大学学报*, 2014, 36(6): 674–679.