

氮、磷、钾肥配施对甜菊生长、产量及糖苷相关指标的影响

杨永恒, 张永侠, 徐晓洋, 孙玉明, 包亚英, 黄苏珍, 佟海英^①

[江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014]

摘要: 为了探明甜菊(*Stevia rebaudiana* Bertoni)的适宜施肥量,采用“3414”肥料试验设计对甜菊品种‘中山4号’(‘Zhongshan No. 4’)的当年生扦插苗进行了盆栽实验,比较了不同氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)配施条件下甜菊产量相关指标(包括株高、茎粗、叶长、叶宽、叶中光合色素含量和单株叶干质量)及叶中糖苷[包括甜菊苷(St)、莱鲍迪昔A(R-A)和总苷]含量和单株积累量的差异,并对拟合的肥料效应方程进行了分析。结果表明:T2组(N、P₂O₅和K₂O施用量分别为300、200和600 mg·kg⁻¹)的株高和叶中光合色素含量以及T6组(N、P₂O₅和K₂O施用量分别为600、300和600 mg·kg⁻¹)的茎粗均最高;T9组(N、P₂O₅和K₂O施用量分别为600、200和900 mg·kg⁻¹)的叶长以及T13组(N、P₂O₅和K₂O施用量分别为600、100和300 mg·kg⁻¹)的叶宽均最大;T4组(N、P₂O₅和K₂O施用量分别为600、100和600 mg·kg⁻¹)的单株叶干质量最高。T1组(N、P₂O₅和K₂O施用量分别为0、200和600 mg·kg⁻¹)的St含量略低于CK组(N、P₂O₅和K₂O施用量均为0 mg·kg⁻¹),但高于其余施肥处理组,并且多数施肥处理组的St含量显著低于CK组;T5组(N、P₂O₅和K₂O施用量分别为600、200和600 mg·kg⁻¹)的R-A和总苷含量,T9组的St单株积累量以及T4组的R-A和总苷单株积累量均最高,且T5组的R-A和总苷单株积累量略低于T4组。极差分析结果表明:3种肥料中,氮肥对甜菊株高、茎粗、叶长、叶宽、叶中光合色素含量、单株叶干质量、St和R-A含量及R-A和总苷单株积累量的影响最大,而钾肥对其叶长、总苷含量和St单株积累量的影响最大。根据拟合的肥料效应方程,单株叶干质量为最高值(4.588 g)时,N、P₂O₅和K₂O施用量分别为701.11、160.20和793.91 mg·kg⁻¹;总苷含量为最高值(24.71%)时,N、P₂O₅和K₂O施用量分别为365.26、176.96和528.35 mg·kg⁻¹。综合考虑单株叶干质量和总苷含量,并结合拟合的肥料效应方程,适宜甜菊的N、P₂O₅和K₂O施用量分别为365.26~701.11、160.20~176.96和528.35~793.91 mg·kg⁻¹。

关键词: 甜菊; 氮、磷、钾肥配施; 生长指标; 叶干质量; 糖苷积累量; 肥料效应方程

中图分类号: Q945.3; S566.9; S506.2 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2018)01-0017-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2018.01.03

Effects of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on related indexes of growth, yield, and glycoside in *Stevia rebaudiana* YANG Yongheng, ZHANG Yongxia, XU Xiaoyang, SUN Yuming, BAO Yaying, HUANG Suzhen, TONG Haiying^① (Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2018, 27(1): 17-26

Abstract: In order to explore the suitable fertilizing amount of *Stevia rebaudiana* Bertoni, pot-culture experiment of annual cutting seedlings of cultivar ‘Zhongshan No. 4’ of *S. rebaudiana* was carried out by using “3414” fertilizer test design, differences in yield related indexes (including height, stem diameter, leaf length, leaf width, photosynthetic pigment content in leaf, and leaf dry weight per plant), and glycoside [including stevioside (St), rebaudioside A (R-A), and total glycoside] content in leaf and its

收稿日期: 2017-10-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31601371); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20160600)

作者简介: 杨永恒(1985—),女,陕西洋县人,博士,助理研究员,主要从事甜菊栽培育种方面的研究。

^①通信作者 E-mail: njtonghy@163.com

accumulation per plant of *S. rebaudiana* were compared under different combined application conditions of nitrogen (N), phosphorus (P_2O_5), and potassium (K_2O), and fitting fertilizer effect equations were analyzed. The results show that height and photosynthetic pigment content in leaf in T2 group (N, P_2O_5 , and K_2O applying amount of 300, 200, and 600 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively) and stem diameter in T6 group (N, P_2O_5 , and K_2O applying amount of 600, 300, and 600 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively) are the highest; leaf length in T9 group (N, P_2O_5 , and K_2O applying amount of 600, 200, and 900 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively) and leaf width in T13 group (N, P_2O_5 , and K_2O applying amount of 600, 100, and 300 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively) are the largest; leaf dry weight per plant in T4 group (N, P_2O_5 , and K_2O applying amount of 600, 100, and 600 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively) is the highest. St content in T1 group (N, P_2O_5 , and K_2O applying amount of 0, 200, and 600 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively) is slightly lower than that in CK group (N, P_2O_5 , and K_2O applying amount of 0 $mg \cdot kg^{-1}$), but higher than that in other fertilizer treatment groups, and that in most fertilizer treatment groups is significantly lower than that in CK group; R-A and total glycoside contents in T5 group (N, P_2O_5 , and K_2O applying amount of 600, 200, and 600 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively), St accumulation per plant in T9 group, and R-A and total glycoside accumulations per plant in T4 group are the highest, and R-A and total glycoside accumulations per plant in T5 group are slightly lower than those in T4 group. The range analysis result shows that among three fertilizers, the effect of nitrogen fertilizer on height, stem diameter, leaf width, photosynthetic pigment content in leaf, leaf dry weight per plant, St and R-A contents, and R-A and total glycoside accumulations per plant of *S. rebaudiana* is the greatest, while that of potassium fertilizer on its leaf length, total glycoside content, and St accumulation per plant is the greatest. According to fitting fertilizer effect equations, with the highest value (4.588 g) of leaf dry weight per plant, the optimal applying amounts of N, P_2O_5 , and K_2O are 701.11, 160.20, and 793.91 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively; with the highest value (24.71%) of total glycoside content, the optimal applying amounts of N, P_2O_5 , and K_2O are 365.26, 176.96, and 528.35 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively. Comprehensively considering leaf dry weight per plant and total glycoside content, and combining fitting fertilizer effect equations, the applying amounts of N, P_2O_5 , and K_2O suitable for *S. rebaudiana* are 365.26–701.11, 160.20–176.96, and 528.35–793.91 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively.

Key words: *Stevia rebaudiana* Bertoni; combined application of nitrogen, phosphorous, and potassium fertilizers; growth index; leaf dry weight; glycoside accumulation; fertilizer effect equation

甜菊(*Stevia rebaudiana* Bertoni)又称甜叶菊,原产南美洲,为多年生草本植物,其体内的甜菊糖苷(steviol glycosides)具有高甜度、低热量的特性^[1],且能降血糖^[2-3]和降血压^[4-6]。赵永光^[7-8]认为,施肥尤其是施用氮肥可显著提高甜菊的产量,且甜菊对氮和钾的需求主要在营养生长阶段,在花期仅吸收少量的磷;在整个生长过程中,甜菊对肥料的需求量从大到小依次为钾、氮、磷。关兴照^[9]也认为,甜菊对钾的需求量最大,对氮的需求量次之,对磷的需求量最小。栾良福等^[10]认为,从产量和成本上考虑,甜菊的总施肥量应控制在 900 $kg \cdot hm^{-2}$,氮、磷、钾肥的质量比为 3:3:1,且氮肥底肥与追肥的质量比为 1:4;而 Aladakatti 等^[11]认为,氮、磷、钾肥的施用量分别为 400、200 和 200 $kg \cdot hm^{-2}$ 时甜菊的干燥叶产量较高。包亚英等^[12]认为,随着不同形态单一氮、磷、钾肥施用量的提高,甜菊幼苗的株高、茎粗、叶长、叶宽、单株叶干质量和单株茎干质量均先升高后降低,N、 P_2O_5

和 K_2O 的最佳施肥量分别为 600~900、200~300 和 600~900 $mg \cdot kg^{-1}$,且氮肥以尿素为宜。综上所述,虽然目前关于甜菊施肥的研究报道较多,但并没有较为一致的结论,不利于甜菊的高产优质栽培生产。

鉴于此,在前期研究基础上,作者采用“3414”肥料试验设计^[13]对不同氮、磷、钾肥配施条件下甜菊品种‘中山4号’(‘Zhongshan No. 4’)当年生扦插苗的产量相关指标及糖苷含量和单株积累量进行了比较,并对拟合的肥料效应方程进行了分析,以期探明甜菊种植过程中氮、磷、钾肥的合理配比,为制定甜菊生产中合理高效的施肥管理措施提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料

以江苏省中国科学院植物研究所自主选育并保存在甜菊种质资源圃的甜菊品种‘中山4号’为研究

对象。栽培基质为 $V(\text{园土}) : V(\text{草炭}) : V(\text{珍珠岩}) : V(\text{河沙}) = 5 : 2 : 2 : 1$ 的混合基质, 有机质含量为 $8.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮、速效磷和速效钾含量分别为 600.00 、 0.93 和 $131.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 6.0, 其中, 园土采自江苏省中国科学院植物研究所树木园林下。

实验使用的甜菊苷 (St) 标准品和莱鲍迪苷 A (R-A) 标准品均购自日本和光纯药工业株式会社, 纯度均大于 99.0%。

1.2 方法

1.2.1 实验设计及施肥方法 根据“3414”肥料试验设计^[13]设置氮、磷、钾肥的施用量水平, 其中, 氮肥施用量设置 0 、 300 、 600 和 $900 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 4 个水平; 磷肥施用量设置 0 、 100 、 200 和 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 4 个水平; 钾肥施用量设置 0 、 300 、 600 和 $900 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 4 个水平。氮肥为尿素 $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$, 磷肥为过磷酸钙 $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$, 钾肥为氯化钾 (KCl), 氮、磷、钾肥施用量分别以纯氮 (N)、五氧化二磷 (P_2O_5) 和氧化钾 (K_2O) 计算。共 14 个处理组, 以 N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量均为 $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为对照 (CK), 其余 13 个施肥处理组分别编号为 T1 至 T13。每个处理组 4 盆, 每盆种植 3 株扦插苗, 并视为 1 个重复。

于 2015 年 4 月 22 日, 在江苏省中国科学院植物研究所普通日光温室内将上述混合基质装入底部具小孔的塑料花盆 (高 20.0 cm 、上口口径 20.0 cm 、底径 14.5 cm) 中, 盆底垫托盘, 每盆装入混合基质 3.0 kg ; 用 500 mL 去离子水将各施肥处理组的磷肥全部施用量和钾肥 50% 施用量的肥料溶解后施入混合基质中; 待土壤充分吸收后, 选取株高约 15 cm 、具 6~8 对叶且长势基本一致的当年生扦插苗, 移栽到上述花盆中, 用去离子水浇灌缓苗。分别于 2015 年 5 月 9 日施入氮肥 30% 施用量, 2015 年 6 月 12 日施入氮肥 40% 施用量和钾肥 50% 施用量, 2015 年 7 月 2 日施入氮肥 30% 施用量。采取常规水分管理, 并及时将托盘内渗漏的溶液倒回混合基质中。

1.2.2 指标测定方法

1.2.2.1 生长指标测定 于 2015 年 7 月 15 日 (现蕾期), 每个处理组随机选择 3 株样株, 用于各生长指标的测定。用直尺 (精度 0.1 cm) 测量从地面到植株生长点的长度作为株高; 用数显游标卡尺 (精度 0.1 mm) 测量植株中部茎的直径作为茎粗; 用直尺 (精度 0.1 cm) 测定植株中部叶片的长度和宽度, 其中, 叶长为叶基至叶尖的长度, 叶宽为叶片最宽处的长度; 分

别收集各单株的全部叶, 洗净后, 在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下杀青 15 min , 并于 $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下烘干至恒质量, 用 MP500B 电子天平 (精度 0.001 g , 上海良平仪器仪表有限公司) 称量单株叶干质量。

1.2.2.2 叶中光合色素含量测定 在生长指标测定当天, 每个处理组随机选取 3 株样株, 分别采集植株中部的新鲜成熟叶片, 将单株叶片剪碎后混匀, 每株称取 0.100 g 叶碎片, 共称取 3 份, 参照包亚英等^[12]的方法使用体积分数 95% 乙醇进行浸提, 并使用 UV-3200 数显分光光度计 (上海美谱达仪器有限公司) 测定叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量, 并根据叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量计算总叶绿素含量。每份样品重复测定 3 次。

1.2.2.3 叶中糖苷含量测定 每个处理组随机选取 3 株样株, 将单株的所有叶片分别烘干至恒质量, 每株称取 0.200 g 干燥叶, 共称取 3 份, 用研钵磨成粉末后, 使用 LC-100 高效液相色谱仪 (包括紫外检测器和色谱工作站, 上海伍丰科学仪器有限公司) 并参照 Yang 等^[14-15]的方法测定 St 和 R-A 的含量, 根据测定结果计算总苷含量。使用的色谱柱为 Hypersil-NH₂ ($250.0 \text{ mm} \times 4.6 \text{ mm}$, $5 \text{ } \mu\text{m}$; 大连依利特分析仪器有限公司)。

1.3 数据处理和统计分析

采用 SPSS 19.0 统计分析软件进行数据处理和统计分析, 采用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性检验, 采用 EXCEL 2010 软件拟合肥料效应方程并进行 F 检验。

2 结果和分析

2.1 氮、磷、钾肥配施对甜菊产量相关指标的影响

2.1.1 对部分生长指标的影响 不同氮、磷、钾肥配施对甜菊株高、茎粗、叶长和叶宽的影响见表 1。结果表明: T2 组 (N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 300 、 200 和 $600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的株高最高, 显著 ($P < 0.05$) 高于 CK 组 (对照, N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量均为 $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 较 CK 组增加了 13.98% , 其余施肥处理组的株高与 CK 组无显著差异。T1 组 (N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 0 、 200 和 $600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的茎粗略高于 CK 组, 而其余施肥处理组的茎粗显著高于 CK 组; 其中, T6 组 (N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 600 、 300 和 $600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的茎粗最大, T2 组次之, 分别较

CK 组增加了 55.46% 和 51.72%。各施肥处理组的叶长显著高于 CK 组,其中,T9 组(N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 600、200 和 900 mg·kg⁻¹)的叶长最长,T4 组(N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 600、100 和 600 mg·kg⁻¹)次之,分别较 CK 组增加了 39.37% 和 33.23%。T1 组的叶宽略高于 CK 组,其余施肥处理组的叶宽显著高于 CK 组;其中,T13 组(N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 600、100 和 300 mg·kg⁻¹)的叶宽最大,较 CK 组增加了 62.75%。

极差分析结果表明:氮肥对甜菊株高的影响最大,对茎粗的影响次之,对叶长的影响较小,对叶宽的影响最小;磷肥对甜菊株高、茎粗、叶长和叶宽的影响顺序与氮肥一致;而钾肥对甜菊株高的影响最大,对叶长的影响次之,对茎粗的影响较小,对叶宽的影响最小。3 种肥料对甜菊株高、茎粗和叶宽的影响从大到小依次为氮肥、磷肥、钾肥,而对叶长的影响从大到小则依次为钾肥、氮肥、磷肥。

表 1 氮、磷、钾肥配施对甜菊部分生长指标的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 1 Effects of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on some growth indexes of *Stevia rebaudiana* Bertoni ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

| 处理组 Treatment group | 施用量/mg·kg ⁻¹ Applying amount | | | 株高/cm Height | 茎粗/mm Stem diameter | 叶长/cm Leaf length | 叶宽/cm Leaf width |
|------------------------|---|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|---------------------|
| | N | P ²⁾ | K ²⁾ | | | | |
| CK | 0 | 0 | 0 | 68.75±1.36bcd | 3.48±0.08f | 6.68±0.09e | 1.53±0.04f |
| T1 | 0 | 200 | 600 | 65.17±1.23d | 3.53±0.07f | 7.37±0.14d | 1.70±0.05f |
| T2 | 300 | 200 | 600 | 78.36±1.86a | 5.28±0.11ab | 8.64±0.17b | 2.11±0.08de |
| T3 | 600 | 0 | 600 | 69.81±1.42bcd | 4.48±0.11e | 8.59±0.12b | 2.06±0.04e |
| T4 | 600 | 100 | 600 | 72.82±1.23bc | 4.78±0.17de | 8.90±0.17ab | 2.26±0.04bcde |
| T5 | 600 | 200 | 600 | 71.91±1.86bc | 4.80±0.15de | 8.65±0.12b | 2.14±0.05de |
| T6 | 600 | 300 | 600 | 73.13±1.94b | 5.41±0.14a | 8.51±0.11b | 2.33±0.06abcd |
| T7 | 600 | 200 | 0 | 67.76±0.68cd | 4.47±0.09e | 7.96±0.16c | 2.17±0.07cde |
| T8 | 600 | 200 | 300 | 72.19±1.10bc | 5.00±0.13bcd | 8.75±0.10b | 2.23±0.04bcde |
| T9 | 600 | 200 | 900 | 69.42±2.00bcd | 5.14±0.18abcd | 9.31±0.23a | 2.41±0.12ab |
| T10 | 900 | 200 | 600 | 68.01±1.81bcd | 5.24±0.07abc | 8.75±0.15b | 2.38±0.10abc |
| T11 | 300 | 100 | 600 | 69.71±1.56bcd | 4.89±0.10cd | 8.52±0.16b | 2.28±0.08abcde |
| T12 | 300 | 200 | 300 | 71.32±1.92bc | 5.09±0.11abcd | 8.61±0.14b | 2.17±0.05cde |
| T13 | 600 | 100 | 300 | 68.74±1.32bcd | 4.84±0.14de | 8.67±0.17b | 2.49±0.10a |
| R _N | | | | 6.17 | 1.74 | 1.73 | 0.77 |
| R _P | | | | 3.85 | 1.43 | 1.06 | 0.55 |
| R _K | | | | 2.86 | 1.17 | 1.99 | 0.45 |

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$).

²⁾ P: 以 P₂O₅ 计算 Calculated with P₂O₅; K: 以 K₂O 计算 Calculated with K₂O.

2.1.2 对叶中光合色素含量的影响 不同氮、磷、钾肥配施对甜菊叶中光合色素含量的影响见表 2。结果表明:T1 组叶中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量均最低,并且均略低于 CK 组;T2 组叶中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量均最高,并且显著高于 CK 组,分别较 CK 组增加了 83.11%、75.77%、80.79% 和 66.29%;T3 组(N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 600、0 和 600 mg·kg⁻¹)叶中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量均较高,均略低于 T2 组但均显著高于 CK 组,分别较 CK 组增加了 77.36%、74.01%、76.24% 和 54.29%;T5 组

(N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 600、200 和 600 mg·kg⁻¹)叶中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量也较高,均略低于 T3 组但均显著高于 CK 组,分别较 CK 组增加了 69.81%、66.30%、68.65% 和 46.86%。

极差分析结果表明:氮肥、磷肥和钾肥对甜菊叶中光合色素含量的影响顺序一致,从大到小依次为总叶绿素含量、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、类胡萝卜素含量。3 种肥料对甜菊叶中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量的影响从大到小均依次为氮肥、钾肥、磷肥。

表 2 氮、磷、钾肥配施对甜菊叶中光合色素含量的影响 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 2 Effects of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on photosynthetic pigment content in leaf of *Stevia rebaudiana* Bertoni ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

| 处理组 Treatment group | 施用量/mg · kg ⁻¹ Applying amount | | | 叶绿素 a 含量/mg · g ⁻¹ Chlorophyll a content | 叶绿素 b 含量/mg · g ⁻¹ Chlorophyll b content | 总叶绿素含量/mg · g ⁻¹ Total chlorophyll content | 类胡萝卜素含量/mg · g ⁻¹ Carotenoid content |
|---------------------------|--|-----------------|-----------------|--|--|--|--|
| | N | P ²⁾ | K ²⁾ | | | | |
| CK | 0 | 0 | 0 | 1.060±0.057gh | 0.454±0.022fg | 1.515±0.079fg | 0.175±0.011fg |
| T1 | 0 | 200 | 600 | 0.823±0.067h | 0.350±0.022g | 1.173±0.090g | 0.136±0.011g |
| T2 | 300 | 200 | 600 | 1.941±0.074a | 0.798±0.041a | 2.739±0.109a | 0.291±0.013a |
| T3 | 600 | 0 | 600 | 1.880±0.094ab | 0.790±0.059a | 2.670±0.148ab | 0.270±0.013ab |
| T4 | 600 | 100 | 600 | 1.731±0.188abc | 0.739±0.088abc | 2.469±0.276abc | 0.237±0.025bcd |
| T5 | 600 | 200 | 600 | 1.800±0.061abc | 0.755±0.039ab | 2.555±0.096abc | 0.257±0.010abc |
| T6 | 600 | 300 | 600 | 1.368±0.059def | 0.560±0.034def | 1.928±0.091de | 0.196±0.007def |
| T7 | 600 | 200 | 0 | 1.159±0.100fg | 0.515±0.040ef | 1.674±0.138ef | 0.172±0.011fg |
| T8 | 600 | 200 | 300 | 1.539±0.124cde | 0.621±0.045bcde | 2.160±0.166cd | 0.219±0.023cde |
| T9 | 600 | 200 | 900 | 1.412±0.067def | 0.595±0.033de | 2.006±0.100de | 0.191±0.009ef |
| T10 | 900 | 200 | 600 | 1.306±0.076efg | 0.567±0.040def | 1.873±0.116def | 0.169±0.009fg |
| T11 | 300 | 100 | 600 | 1.610±0.073bcd | 0.680±0.041abcd | 2.290±0.111bcd | 0.225±0.012cde |
| T12 | 300 | 200 | 300 | 1.535±0.093cde | 0.597±0.041de | 2.132±0.135cd | 0.226±0.013cde |
| T13 | 600 | 100 | 300 | 1.552±0.062ce | 0.612±0.030cde | 2.164±0.091cd | 0.238±0.008bcd |
| R _N | | | | 0.754 | 0.290 | 1.043 | 0.092 |
| R _P | | | | 0.263 | 0.117 | 0.380 | 0.037 |
| R _K | | | | 0.448 | 0.170 | 0.618 | 0.054 |

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

²⁾ P: 以 P₂O₅ 计算 Calculated with P₂O₅; K: 以 K₂O 计算 Calculated with K₂O.

2.1.3 对单株叶干质量的影响 不同氮、磷、钾肥配施对甜菊单株叶干质量的影响见表 3。结果表明:T1组的单株叶干质量最低,显著低于其余施肥处理组但略低于 CK 组;其余施肥处理组的单株叶干质量显著高于 CK 组。其中,T4 组的单株叶干质量最高,T9 组次之,分别较 CK 组增加了 174.46%和 157.27%。

极差分析结果表明:3 种肥料对甜菊单株叶干质量的影响从大到小依次为氮肥、钾肥、磷肥。

根据上述实验数据获得甜菊单株叶干质量 (Y) 与 N 施用量 (X_N)、P₂O₅ 施用量 (X_P) 和 K₂O 施用量 (X_K) 的三元二次回归方程: $Y = 1.709 + (5.634 \times 10^{-3}) X_N + (8.731 \times 10^{-3}) X_P + (5.155 \times 10^{-4}) X_K - (7.328 \times 10^{-6}) X_N^2 - (3.290 \times 10^{-5}) X_P^2 - (2.570 \times 10^{-6}) X_K^2 + (3.179 \times 10^{-6}) X_N X_P + (5.205 \times 10^{-6}) X_N X_K - (5.237 \times 10^{-7}) X_P X_K$ ($R^2 = 0.983$)。对此肥料效应方程进行 F 检验,结果表明:甜菊单株叶干质量与氮、磷、钾肥施用量显著相关。根据此肥料效应方程计算出甜菊单株叶干质量的最高值为 4.588 g,对应的 N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 701.11、160.20 和 793.91 mg · kg⁻¹。

2.2 氮、磷、钾肥配施对甜菊叶中糖苷含量的影响

不同氮、磷、钾肥配施对甜菊叶中糖苷含量的影

表 3 氮、磷、钾肥配施对甜菊单株叶干质量的影响 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 3 Effects of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on leaf dry weight per plant of *Stevia rebaudiana* Bertoni ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

| 处理组 Treatment group | 施用量/mg · kg ⁻¹ Applying amount | | | 单株叶干质量/g Leaf dry weight per plant |
|---------------------------|--|-----------------|-----------------|--|
| | N | P ²⁾ | K ²⁾ | |
| CK | 0 | 0 | 0 | 1.699±0.107d |
| T1 | 0 | 200 | 600 | 1.452±0.064d |
| T2 | 300 | 200 | 600 | 3.592±0.245bc |
| T3 | 600 | 0 | 600 | 3.609±0.246bc |
| T4 | 600 | 100 | 600 | 4.663±0.334a |
| T5 | 600 | 200 | 600 | 4.144±0.331ab |
| T6 | 600 | 300 | 600 | 3.955±0.272abc |
| T7 | 600 | 200 | 0 | 3.263±0.295c |
| T8 | 600 | 200 | 300 | 4.040±0.226abc |
| T9 | 600 | 200 | 900 | 4.371±0.414ab |
| T10 | 900 | 200 | 600 | 3.996±0.288abc |
| T11 | 300 | 100 | 600 | 3.709±0.177bc |
| T12 | 300 | 200 | 300 | 3.761±0.155bc |
| T13 | 600 | 100 | 300 | 4.071±0.264abc |
| R | 2.439 | 1.494 | 1.890 | |

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

²⁾ P: 以 P₂O₅ 计算 Calculated with P₂O₅; K: 以 K₂O 计算 Calculated with K₂O.

响见表 4。结果表明:CK 组(对照,N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量均为 0 mg·kg⁻¹)叶中甜菊苷(St)含量最高;T1 组(N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 0、200 和 600 mg·kg⁻¹)、T2 组(N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 300、200 和 600 mg·kg⁻¹)和 T11 组(N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 300、100 和 600 mg·kg⁻¹)叶中 St 含量与 CK 组差异不显著,而其余施肥处理组叶中 St 含量显著($P<0.05$) 低于 CK 组;其中,T7 组(N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 600、200 和 0 mg·kg⁻¹)叶中 St 含量最低,较 CK 组降低了 45.69%;并且,T3 组(N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 600、0 和 600 mg·kg⁻¹)叶中 St 含量与 T1 组和 T7 组差异不显著,但 T1 组叶中 St 含量显著高于 T7 组。T5 组(N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 600、200 和 600 mg·kg⁻¹)叶中莱鲍迪苷 A(R-A)含量最高,较 CK 组增加了 43.02%;T3 组、

T4 组(N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 600、100 和 600 mg·kg⁻¹)、T5 组和 T10 组(N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 900、200 和 600 mg·kg⁻¹)叶中 R-A 含量显著高于 CK 组,而其余施肥处理组叶中 R-A 含量与 CK 组差异不显著;并且,T3 组叶中 R-A 含量显著高于 T1 组和 T7 组,但 T1 组和 T7 组叶中 R-A 含量差异不显著。T7 组、T8 组(N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 600、200 和 300 mg·kg⁻¹)和 T13 组(N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 600、100 和 300 mg·kg⁻¹)叶中总苷含量显著低于 CK 组,其中,T7 组叶中总苷含量最低,较 CK 组降低了 25.48%;其余施肥处理组叶中总苷含量与 CK 组差异不显著,其中,T5 组叶中总苷含量最高,较 CK 组增加了 14.22%;并且,T1 组和 T3 组叶中总苷含量差异不显著,但 T7 组叶中总苷含量显著低于 T1 组和 T3 组。

表 4 氮、磷、钾肥配施对甜菊叶中糖苷含量的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 4 Effects of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on glycoside content in leaf of *Stevia rebaudiana* Bertoni ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

| 处理组 Treatment group | 施用量/mg·kg ⁻¹ Applying amount | | | 甜菊苷含量/% Stevioside content | 莱鲍迪苷 A 含量/% Rebaudioside A content | 总苷含量/% Total glycoside content |
|------------------------|---|-----------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| | N | P ²⁾ | K ²⁾ | | | |
| CK | 0 | 0 | 0 | 9.98±1.17a | 15.69±1.05de | 25.67±1.16ab |
| T1 | 0 | 200 | 600 | 8.69±0.68ab | 15.19±0.97e | 23.88±0.56bc |
| T2 | 300 | 200 | 600 | 8.10±0.45abc | 16.59±0.77cde | 24.68±0.80b |
| T3 | 600 | 0 | 600 | 7.38±0.56bcde | 19.90±0.74abc | 27.28±0.74ab |
| T4 | 600 | 100 | 600 | 5.98±0.53cde | 20.41±1.31ab | 26.39±0.95ab |
| T5 | 600 | 200 | 600 | 6.88±0.69bcde | 22.44±0.61a | 29.32±1.06a |
| T6 | 600 | 300 | 600 | 6.67±0.40bcde | 19.04±1.69abcd | 25.72±1.39ab |
| T7 | 600 | 200 | 0 | 5.42±0.90e | 13.70±0.50e | 19.13±0.81d |
| T8 | 600 | 200 | 300 | 5.86±0.41de | 14.51±1.74e | 20.37±1.78cd |
| T9 | 600 | 200 | 900 | 7.77±0.89bcd | 16.93±0.88bcde | 24.70±1.50b |
| T10 | 900 | 200 | 600 | 6.37±0.60ede | 19.70±1.28abc | 26.07±1.73ab |
| T11 | 300 | 100 | 600 | 8.01±0.43abcd | 16.47±1.28cde | 24.48±1.52b |
| T12 | 300 | 200 | 300 | 7.34±0.51bcde | 16.93±1.06bcde | 24.27±0.87b |
| T13 | 600 | 100 | 300 | 6.76±0.31bcde | 13.70±1.48e | 20.46±1.77cd |
| R _N | | | | 2.97 | 4.26 | 1.90 |
| R _P | | | | 2.01 | 2.18 | 2.70 |
| R _K | | | | 1.12 | 4.02 | 4.28 |

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

²⁾ P: 以 P₂O₅ 计算 Calculated with P₂O₅; K: 以 K₂O 计算 Calculated with K₂O.

极差分析结果表明:氮肥对甜菊叶中 R-A 含量的影响最大,对 St 含量的影响次之,对总苷含量的影响最小;磷肥对甜菊叶中总苷含量的影响最大,对 R-A 含量的影响次之,对 St 含量的影响最小;钾肥对甜菊叶中 St、R-A 和总苷含量的影响顺序与磷肥一致。3 种肥料对甜菊叶中 St 含量的影响从大到小依次为

氮肥、磷肥、钾肥,对 R-A 含量的影响从大到小依次为氮肥、钾肥、磷肥,对总苷含量的影响从大到小依次为钾肥、磷肥、氮肥。

根据上述实验数据获得甜菊叶中 St 含量(Y)与 N 施用量(X_N)、P₂O₅ 施用量(X_P)和 K₂O 施用量(X_K)的三元二次回归方程: $Y = 10.030 - (5.153 \times$

$10^{-3}) X_N - (1.071 \times 10^{-2}) X_P - (1.950 \times 10^{-3}) X_K + (1.289 \times 10^{-6}) X_N^2 + (6.967 \times 10^{-6}) X_P^2 + (7.641 \times 10^{-7}) X_K^2 - (8.395 \times 10^{-7}) X_N X_P + (1.791 \times 10^{-6}) X_N X_K + (1.352 \times 10^{-5}) X_P X_K (R^2 = 0.930)$ 。对此肥料效应方程进行 F 检验,结果表明:甜菊叶中 St 含量与氮、磷、钾肥施用量显著相关。由于此肥料效应方程中 X_N 、 X_P 和 X_K 的一次项系数均为负值,说明增施氮、磷、钾肥均可使甜菊叶中 St 含量下降。根据此肥料效应方程计算出甜菊叶中 St 含量的最高值为 7.69%,对应的 N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 392.05、0.00 和 816.41 $mg \cdot kg^{-1}$ 。

根据上述实验数据获得甜菊叶中 R-A 含量 (Y) 与 N 施用量 (X_N)、 P_2O_5 施用量 (X_P) 和 K_2O 施用量 (X_K) 的三元二次回归方程: $Y = 15.454 - (1.738 \times 10^{-2}) X_N + (1.988 \times 10^{-2}) X_P + (1.157 \times 10^{-2}) X_K - (1.635 \times 10^{-7}) X_N^2 + (4.580 \times 10^{-5}) X_P^2 - (1.192 \times 10^{-5}) X_K^2 + (1.518 \times 10^{-5}) X_N X_P + (3.449 \times 10^{-5}) X_N X_K - (7.618 \times 10^{-5}) X_P X_K (R^2 = 0.693)$ 。对此肥料效应方程进行 F 检验,结果表明:甜菊叶中 R-A 含量与氮、磷、钾肥施用量显著相关。由于此肥料效应方程中 X_N 的一次项系数为负值,说明增施氮肥可使甜菊叶中 R-A 含量下降; X_P 和 X_K 的一次项系数均为正值,且 X_P 的一次项系数大于 X_K ,说明增施磷肥和钾肥均可使甜菊叶中 R-A 含量升高,且磷肥的效果强于钾肥。同时,此肥料效应方程中 X_N 和 X_K 的二次项系数均为负值,说明过量施用氮肥和钾肥将造成甜菊叶中 R-A 含量下降,使肥料利用率降低。根据此肥料效应方程计算出甜菊叶中 R-A 含量的最高值为 17.16%,对应的 N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 242.67、119.87 和 453.43 $mg \cdot kg^{-1}$ 。

根据上述实验数据获得甜菊叶中总苷含量 (Y) 与 N 施用量 (X_N)、 P_2O_5 施用量 (X_P) 和 K_2O 施用量 (X_K) 的三元二次回归方程: $Y = 25.484 - (2.253 \times 10^{-2}) X_N + (9.080 \times 10^{-3}) X_P + (9.624 \times 10^{-3}) X_K + (1.133 \times 10^{-6}) X_N^2 + (5.311 \times 10^{-5}) X_P^2 - (1.113 \times 10^{-5}) X_K^2 + (1.442 \times 10^{-5}) X_N X_P + (3.624 \times 10^{-5}) X_N X_K - (6.273 \times 10^{-5}) X_P X_K (R^2 = 0.741)$ 。对此肥料效应方程进行 F 检验,结果表明:甜菊叶中总苷含量与氮、磷、钾肥施用量显著相关。由于此肥料效应方程中 X_N 的一次项系数为负值,说明增施氮肥可使甜菊叶中总苷含量下降; X_P 和 X_K 的一次项系数均为正值,

且 X_K 的一次项系数大于 X_P ,说明增施磷肥和钾肥均可使甜菊叶中总苷含量升高,且钾肥的效果强于磷肥。同时,此肥料效应方程中 X_K 的二次项系数为负值,说明过量施用钾肥将造成甜菊叶中总苷含量下降,使肥料利用率降低。根据此肥料效应方程计算出甜菊叶中总苷含量的最高值为 24.71%,对应的 N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 365.26、176.96 和 528.35 $mg \cdot kg^{-1}$ 。

2.3 氮、磷、钾肥配施对甜菊糖苷单株积累量的影响

根据甜菊的单株叶干质量和叶中糖苷含量计算并分析氮、磷、钾肥配施对甜菊糖苷单株积累量的影响,结果见表 5。结果表明:T1 组(N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 0、200 和 600 $mg \cdot kg^{-1}$)的甜菊苷(St)、莱鲍迪苷 A(R-A)和总苷单株积累量均低于 CK 组(对照,N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量均为 0 $mg \cdot kg^{-1}$),而其余施肥处理组的 St、R-A 和总苷单株积累量均高于 CK 组;其中,T9 组(N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 600、200 和 900 $mg \cdot kg^{-1}$)的 St 单株积累量最高,显著($P < 0.05$)高于 CK 组,较 CK 组增加了 99.41%;T4 组(N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 600、100 和 600 $mg \cdot kg^{-1}$)的 R-A 和总苷单株积累量均最高,且显著高于 CK 组,分别较 CK 组增加了 256.77% 和 182.30%,T5 组(N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 600、200 和 600 $mg \cdot kg^{-1}$)的 R-A 和总苷单株积累量均略低于 T4 组但显著高于 CK 组,分别较 CK 组增加了 249.25% 和 178.85%。

极差分析结果表明:氮肥、磷肥和钾肥对甜菊 St、R-A 和总苷单株积累量的影响顺序一致,从大到小依次为总苷单株积累量、R-A 单株积累量、St 单株积累量。3 种肥料对甜菊 St 单株积累量的影响从大到小依次为钾肥、氮肥、磷肥,对甜菊 R-A 和总苷单株积累量的影响从大到小依次为氮肥、钾肥、磷肥。

根据上述实验数据获得甜菊 St 单株积累量 (Y) 与 N 施用量 (X_N)、 P_2O_5 施用量 (X_P) 和 K_2O 施用量 (X_K) 的三元二次回归方程: $Y = 0.173 + (3.075 \times 10^{-4}) X_N + (4.119 \times 10^{-4}) X_P + (2.769 \times 10^{-6}) X_K - (5.691 \times 10^{-7}) X_N^2 - (2.236 \times 10^{-6}) X_P^2 - (1.383 \times 10^{-7}) X_K^2 + (2.663 \times 10^{-7}) X_N X_P + (4.403 \times 10^{-7}) X_N X_K + (1.693 \times 10^{-7}) X_P X_K (R^2 = 0.929)$ 。对此肥料效应方程进行 F 检验,结果表明:甜菊的 St 单株积累量与氮、磷、钾肥施用量显著相关。由于此肥料效应方程

中 X_N 、 X_P 和 X_K 的一次项系数均为正值,且 X_P 的一次项系数最大、 X_K 的一次项系数最小,说明增施氮、磷、钾肥均可使甜菊的 St 单株积累量升高,且磷肥的效果最强。同时,此肥料效应方程中 X_N 、 X_P 和 X_K 的二次项系数均为负值,说明过量施用氮、磷、钾肥将造成甜菊的 St 单株积累量下降。根据此肥料效应方程

计算出甜菊 St 单株积累量的最高值为 0.369 g,对应的 N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 974.99、214.28 和 1 692.69 $mg \cdot kg^{-1}$ 。但是,由于计算出的氮肥和钾肥的最佳施用量均超出实验设置的施用量范围,因此,此肥料效应方程不适于根据甜菊 St 单株积累量最高值预测氮、磷、钾肥的施用量。

表 5 氮、磷、钾肥配施对甜菊糖苷单株积累量的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 5 Effects of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on glycoside accumulation per plant of *Stevia rebaudiana* Bertoni ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

| 处理组 Treatment group | 施用量/ $mg \cdot kg^{-1}$ Applying amount | | | 甜菊苷单株积累量/g Stevioside accumulation per plant | 莱鲍迪苷 A 单株积累量/g Rebaudioside A accumulation per plant | 总苷单株积累量/g Total glycoside accumulation per plant |
|------------------------|---|-----------------|-----------------|--|--|--|
| | N | P ²⁾ | K ²⁾ | | | |
| CK | 0 | 0 | 0 | 0.169±0.009d | 0.266±0.001de | 0.435±0.008de |
| T1 | 0 | 200 | 600 | 0.126±0.004e | 0.220±0.004e | 0.346±0.007e |
| T2 | 300 | 200 | 600 | 0.290±0.004b | 0.595±0.013cd | 0.885±0.032bcd |
| T3 | 600 | 0 | 600 | 0.265±0.002bc | 0.717±0.022bc | 0.983±0.040bc |
| T4 | 600 | 100 | 600 | 0.278±0.005bc | 0.949±0.008a | 1.228±0.044a |
| T5 | 600 | 200 | 600 | 0.284±0.026bc | 0.929±0.049a | 1.213±0.053a |
| T6 | 600 | 300 | 600 | 0.263±0.002bcd | 0.750±0.015bc | 1.015±0.015abc |
| T7 | 600 | 200 | 0 | 0.175±0.013d | 0.446±0.024d | 0.623±0.030d |
| T8 | 600 | 200 | 300 | 0.236±0.003cd | 0.584±0.038cd | 0.820±0.026cd |
| T9 | 600 | 200 | 900 | 0.337±0.007a | 0.738±0.032bc | 1.075±0.037ab |
| T10 | 900 | 200 | 600 | 0.253±0.006bcd | 0.785±0.006bc | 1.038±0.007abc |
| T11 | 300 | 100 | 600 | 0.297±0.002b | 0.609±0.018cd | 0.906±0.013bc |
| T12 | 300 | 200 | 300 | 0.276±0.008bc | 0.636±0.014bcd | 0.912±0.005bc |
| T13 | 600 | 100 | 300 | 0.275±0.005bc | 0.555±0.024cd | 0.830±0.018cd |
| R_N | | | | 0.140 | 0.542 | 0.648 |
| R_P | | | | 0.066 | 0.259 | 0.305 |
| R_K | | | | 0.165 | 0.382 | 0.547 |

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$).

²⁾ P: 以 P_2O_5 计算 Calculated with P_2O_5 ; K: 以 K_2O 计算 Calculated with K_2O .

根据上述实验数据获得甜菊 R-A 单株积累量 (Y) 与 N 施用量 (X_N)、 P_2O_5 施用量 (X_P) 和 K_2O 施用量 (X_K) 的三元二次回归方程: $Y = 0.258 + (1.851 \times 10^{-4}) X_N + (2.330 \times 10^{-3}) X_P + (5.147 \times 10^{-4}) X_K - (1.141 \times 10^{-6}) X_N^2 - (3.936 \times 10^{-6}) X_P^2 - (8.459 \times 10^{-7}) X_K^2 + (1.103 \times 10^{-6}) X_N X_P + (2.178 \times 10^{-6}) X_N X_K - (3.085 \times 10^{-6}) X_P X_K$ ($R^2 = 0.912$)。对此肥料效应方程进行 F 检验,结果表明:甜菊的 R-A 单株积累量与氮、磷、钾肥施用量显著相关。由于此肥料效应方程中 X_N 、 X_P 和 X_K 的一次项系数均为正值,且 X_P 的一次项系数最大、 X_N 的一次项系数最小,说明增施氮、磷、钾肥均可使甜菊的 R-A 单株积累量升高,且磷肥的效果最强。同时,此肥料效应方程中 X_N 、 X_P 和 X_K 的二次项系数均为负值,说明过量施用氮、磷、钾肥将

造成甜菊的 R-A 单株积累量下降。根据此肥料效应方程计算出甜菊 R-A 单株积累量的最高值为 0.664 g,对应的 N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 228.16、327.94 和 0.00 $mg \cdot kg^{-1}$ 。但是,由于计算出的磷肥最佳施肥量超出实验设置的施用量范围,因此,此肥料效应方程不适于根据甜菊 R-A 单株积累量最高值预测氮、磷、钾肥的施用量。

根据上述实验数据获得甜菊总苷单株积累量 (Y) 与 N 施用量 (X_N)、 P_2O_5 施用量 (X_P) 和 K_2O 施用量 (X_K) 的三元二次回归方程: $Y = 0.430 + (4.926 \times 10^{-4}) X_N + (2.742 \times 10^{-3}) X_P + (5.174 \times 10^{-4}) X_K - (1.711 \times 10^{-6}) X_N^2 - (6.172 \times 10^{-6}) X_P^2 - (9.843 \times 10^{-7}) X_K^2 + (1.370 \times 10^{-6}) X_N X_P + (2.618 \times 10^{-6}) X_N X_K - (2.915 \times 10^{-6}) X_P X_K$ ($R^2 = 0.955$)。对此肥料效应方

程进行 F 检验, 结果表明: 甜菊的总苷单株积累量与氮、磷、钾肥施用量显著相关。由于此肥料效应方程中 X_N 、 X_P 和 X_K 的一次项系数均为正值, 且 X_P 的一次项系数最大、 X_N 的一次项系数最小, 说明增施氮、磷、钾肥均可使甜菊的总苷单株积累量升高, 且磷肥的效果最强。同时, 此肥料效应方程中 X_N 、 X_P 和 X_K 的二次项系数均为负值, 说明过量施用氮、磷、钾肥将造成甜菊的总苷单株积累量下降。根据此肥料效应方程计算出甜菊总苷单株积累量的最高值为 0.775 g, 对应的 N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 56.69、228.41 和 0.00 $mg \cdot kg^{-1}$ 。但是, 由于计算出的总苷单株积累量远低于测定的总苷单株积累量最高值 (即 T4 组的总苷单株积累量 1.228 g), 因此, 此肥料效应方程不适于根据甜菊总苷单株积累量最高值预测氮、磷、钾肥的施用量。

3 讨论和结论

本研究结果表明: 合理配施氮、磷、钾肥可提高甜菊的株高、茎粗、叶长、叶宽、叶中光合色素含量和单株叶干质量, 而不合理配施氮、磷、钾肥则对上述指标产生负面影响, 并且, 氮肥对甜菊单株叶干质量的影响最大。不施氮组 (T1 组, N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 0、200 和 600 $mg \cdot kg^{-1}$) 甜菊的单株叶干质量显著低于不施磷组 (T3 组, N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 600、0 和 600 $mg \cdot kg^{-1}$) 和不施钾组 (T7 组, N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 600、200 和 0 $mg \cdot kg^{-1}$), 与包亚英等^[12]和林洪鑫等^[16]的研究结果相同, 这可能是因为氮素是组成植物体内蛋白质的主要成分, 参与植物所有的生命活动和代谢过程, 增施氮肥可增加植物叶片的光合面积, 提高叶片的光合速率, 利于植物的营养生长^[17-18]。

磷是细胞质和细胞膜的主要成分, 增施磷肥可促进植物生长和花芽分化, 促使株高增大^[19-20]; 钾虽然不参与植物体内有机物质合成, 但能够促进植物细胞的呼吸进程以及细胞内核酸和蛋白质的形成, 增施钾肥可改善植物细胞内叶绿体的结构和功能, 从而提高叶中光合色素含量^[21-22]。本研究结果表明: 只有合理配施氮、磷、钾肥才能达到甜菊的最大增产效应, 任一肥料不足或过量均不利于甜菊生长, 从而影响其产量。例如: 氮肥过量的 T10 组 (N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 900、200 和 600 $mg \cdot kg^{-1}$) 甜菊的单株叶干

质量低于同等磷肥和钾肥水平的 T5 组 (N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 600、200 和 600 $mg \cdot kg^{-1}$); 磷肥过量的 T6 组 (N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 600、100 和 600 $mg \cdot kg^{-1}$) 甜菊的单株叶干质量低于同等氮肥和钾肥水平的 T4 组 (N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 600、200 和 600 $mg \cdot kg^{-1}$) 和 T5 组。对拟合肥料效应方程的分析结果表明: 甜菊的单株叶干质量最高值为 4.588 g, 对应的 N、 P_2O_5 、 K_2O 施用量分别为 701.11、160.20 和 793.91 $mg \cdot kg^{-1}$, 该氮、磷、钾肥比例与赵永光^[7]获得的甜菊营养期氮、磷、钾吸收比例 (1.00:0.30:1.42) 接近, 说明合理的施肥配比应符合甜菊生长的营养吸收规律。

大量研究表明: 适当增施氮、磷、钾肥利于提高植物次生代谢产物含量^[23-25]。甜菊苷 (St) 和莱鲍迪苷 A (R-A) 为甜菊叶中的 2 个主要糖苷组分, St 有后苦味, R-A 甜度更高且甜味近似蔗糖, 因此, 在甜菊生产中常常以总苷含量和 R-A 含量高作为生产目标。本研究结果显示: 合理配施氮、磷、钾肥可提高甜菊叶中 R-A 和总苷含量, 同时可降低叶中 St 含量, 说明合理配施氮、磷、钾肥能够有效改善甜菊的品质。对拟合肥料效应方程的分析结果表明: 甜菊叶中 St 含量的最高值为 7.69%, 对应的 N、 P_2O_5 、 K_2O 施用量分别为 392.05、0.00 和 816.41 $mg \cdot kg^{-1}$; 甜菊叶中 R-A 含量的最高值为 17.16%, 对应的 N、 P_2O_5 、 K_2O 施用量分别为 242.67、119.87 和 453.43 $mg \cdot kg^{-1}$; 甜菊叶中总苷含量的最高值为 24.71%, 对应的 N、 P_2O_5 、 K_2O 施用量分别为 365.26、176.96 和 528.35 $mg \cdot kg^{-1}$ 。

由于本研究获得的甜菊 St、R-A 和总苷的单株积累量与氮、磷、钾肥施用量的三元二次回归方程不适于根据各指标最高值预测氮、磷、钾肥施用量, 无法指导生产实践, 因此, 综合考虑单株叶干质量和总苷含量, 并结合拟合肥料效应方程, 适宜甜菊的 N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 365.26 ~ 701.11、160.20 ~ 176.96 和 528.35 ~ 793.91 $mg \cdot kg^{-1}$ 。

另外, 由于根据拟合的肥料效应方程计算出的甜菊单株叶干质量和叶中糖苷含量的最高值均低于实验测定的最高值, 这可能是由于本研究采用的“3414”肥料试验设计方案是国家测土配方施肥工作推荐的实验设计方案, 旨在提高作物产量, 降低施肥成本, 以追求更高的经济效益^[13], 因此, 本研究得出

的最高产量并不是最佳产量,应结合理论实验和生产实践提出更加合理的施肥方案,以期不但能降低施肥成本,提高经济效益,而且更利于维持土壤肥力,促进生态环境优化。

参考文献:

- [1] YADAV A K, SINGH S, DHYANI D, et al. A review on the improvement of stevia [*Stevia rebaudiana* (Bertoni)] [J]. Canadian Journal of Plant Science, 2011, 91: 1-27.
- [2] AKBARZADEH S, ESKANDARI F, TANGESTANI H, et al. The effect of *Stevia rebaudiana* on serum omentin and visfatin level in STZ-induced diabetic rats [J]. Journal of Dietary Supplements, 2015, 12: 11-22.
- [3] JEPPESEN P B, GREGERSEN S, ROLFSEN S E D, et al. Antihyperglycemic and blood pressure-reducing effects of stevioside in the diabetic Goto-Kakizaki rat [J]. Metabolism, 2003, 52: 372-378.
- [4] FERRI L A F, ALVES-DO-PRADO W, YAMADA S S, et al. Investigation of the antihypertensive effect of oral crude stevioside in patients with mild essential hypertension [J]. Phytotherapy Research, 2006, 20: 732-736.
- [5] CHATSUDTHIPONG V, MUANPRASAT C. Stevioside and related compounds: therapeutic benefits beyond sweetness [J]. Pharmacology and Therapeutics, 2009, 121: 41-54.
- [6] TAKASAKI M, KONOSHIMA T, KOZUKA M, et al. Cancer preventive agents. Part 8: chemopreventive effects of stevioside and related compounds [J]. Bioorganic and Medicinal Chemistry, 2009, 17: 600-605.
- [7] 赵永光. 甜叶菊的营养特性及施肥效应 [J]. 热带作物学报, 1985, 6(2): 129-134.
- [8] 赵永光. 甜叶菊氮肥用量及其效益 [J]. 中国土壤与肥料, 1987(1): 34-36.
- [9] 关兴照. 甜菊的需肥规律及其施用技术 [J]. 中国糖料, 1999(1): 48.
- [10] 栾良福, 臧传江, 李绪太, 等. 甜菊施肥配比试验简报 [J]. 中国糖料, 1998(4): 25-32.
- [11] ALADAKATTI Y R, PALLED Y B, CHETTI M B, et al. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium levels on growth and yield of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni.) [J]. Karnataka Journal of Agricultural Sciences, 2012, 25: 115-118.
- [12] 包亚英, 胡秀英, 郝雨杉, 等. 不同施肥处理对甜菊生长及糖苷含量和积累量的影响 [J]. 植物资源与环境学报, 2016, 25(1): 71-80.
- [13] 宋朝玉, 宫明波, 李振清, 等. “3414”肥料试验结果统计方法的讨论与分析 [J]. 天津农业科学, 2012, 18(6): 38-42.
- [14] YANG Y H, HUANG S Z, HAN Y L, et al. Base substitution mutations in uridinediphosphate-dependent glycosyltransferase 76G1 gene of *Stevia rebaudiana*, causes the low levels of rebaudioside A; mutations in *UGT76G1*, a key gene of steviol glycosides synthesis [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2014, 80: 220-225.
- [15] YANG Y H, HUANG S Z, HAN Y L, et al. Environmental cues induce changes of steviol glycosides contents and transcription of corresponding biosynthetic genes in *Stevia rebaudiana* [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2015, 86: 174-180.
- [16] 林洪鑫, 袁展汽, 刘仁根, 等. 不同氮磷钾处理对木薯产量、养分积累、利用及经济效益的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1457-1465.
- [17] 李文庆, 张民, 束怀瑞. 氮素在果树上的生理作用 [J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2002, 33(1): 96-100.
- [18] 来改英, 王贵荣, 王宏富. 不同氮肥水平对小麦后期叶片光合速率的影响 [J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2003, 23(1): 32-35.
- [19] 刘大会, 刘伟, 朱端卫, 等. 磷肥施用量对药用菊花生长、产量和养分吸收的影响 [J]. 西南农业学报, 2010, 23(5): 1575-1580.
- [20] 王东光, 尹光天, 杨锦昌, 等. 磷肥对闽楠苗木生长及叶片氮磷钾浓度的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(3): 40-44.
- [21] 宋姗姗, 隆小华, 刘玲, 等. 不同钾肥用量对长春花盛花期生长和生物碱含量的影响 [J]. 土壤, 2011, 43(6): 935-940.
- [22] 邱佳妹, 王康才, 朱光明, 等. 不同施肥对比对麦冬幼苗光合特性及干物质分配的影响 [J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(2): 61-66, 111.
- [23] 张秋芳, 刘波, 史怀, 等. 氮磷钾肥对地道药材建泽泻生长与品质的影响 [J]. 植物资源与环境学报, 2006, 15(3): 39-42.
- [24] 张建海, 冯彬彬, 徐晓玉. 氮磷钾配合施用对野菊花内在品质的影响 [J]. 河南农业科学, 2013, 42(8): 92-97.
- [25] 李乃伟, 彭峰, 冯煦, 等. 不同施肥处理对曼地亚红豆杉 ‘Hicksii’ 生长和紫杉醇含量的影响 [J]. 植物资源与环境学报, 2008, 17(2): 28-33.

(责任编辑: 佟金凤)