

施氮对设施栽培金针菜产量、品质和钾吸收利用的影响

张国伟¹, 王晓婧¹, 周玲玲², 刘瑞显^{1*}, 杨长琴¹

(1 江苏省农业科学院经济作物研究所/农业部长江下游棉花与油菜重点实验室, 江苏南京 210014;
2 江苏省农业科学院宿迁农科所, 江苏宿迁 223800)

摘要:【目的】明确施氮对设施栽培金针菜产量、品质和钾吸收利用的影响, 为设施栽培金针菜的养分管理提供理论依据。【方法】以金针菜‘大乌嘴’为试验材料, 于 2015—2017 年在江苏省宿迁市丁嘴镇江苏省农业科学院金针菜试验基地进行了田间试验。设 5 个施氮量处理 (N 0、50、100、150 和 200 kg/hm², 以 N0、N50、N100、N150、N200 表示)。在返青期、抽薹期和现蕾期采样分析了金针菜产量、品质和钾的吸收利用。【结果】增施氮肥提高了金针菜不同生育阶段的钾吸收量, 以抽薹到现蕾期钾吸收量增量最大。与 N0 相比, N50、N100、N150 和 N200 处理下的钾吸收量分别增加 21.0%、67.6%、86.0% 和 103.8%, 处理间差异达到显著水平。施氮改变了不同生育时段的钾吸收比例, 使返青到抽薹期的钾吸收比例降低, 抽薹到现蕾期的钾吸收比例升高, 其中 N200 处理下效果最显著。增施氮肥降低了现蕾期生育后期钾浓度的下降速率, 其中, N0、N50、N100、N150 和 N200 处理下表示钾浓度降低趋势的 *b* 值分别为 0.0051、0.0048、0.0045、0.0044 和 0.0042。随施氮量增加, 钾吸收的边际效应呈先升高后降低趋势, 而钾的生产效率呈直线降低趋势。N100、N150 处理的金针菜积累的干物质和钾量在花蕾中的分配比例较高, 钾浓度和钾累积量动态特征参数比较协调, 利于产量形成, 且 V_c、氨基酸、可溶性糖、黄酮和多酚含量相对较高; N 200 kg/hm² 处理导致金针菜产量增幅下降, 氮素钾吸收边际效应和钾的生产效率降低, 但秋水仙碱含量最高; 低于 N 100 kg/hm² 时, 干物质和钾的总吸收量及经济系数较低, 不利于高产形成。【结论】供试条件下, 施用氮肥 N 100~150 kg/hm² 可减缓金针菜生育期后期钾吸收的下降, 提高钾吸收边际效应、钾的生产效率和金针菜的品质。

关键词: 金针菜; 施氮量; 产量; 品质; 钾吸收利用

Effects of nitrogen application rate on yield, quality, potassium uptake and utilization of daylily (*Hemerocallis citrina* Baroni) in protected cultivation

ZHANG Guo-wei¹, WANG Xiao-jing¹, ZHOU Ling-ling², LIU Rui-xian^{1*}, YANG Chang-qin¹

(1 Institute of Industrial Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Cotton and Rapeseed in the Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China; 2 Suqian Institute of Agricultural Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Suqian, Jiangsu 223800, China)

Abstract: 【Objectives】The purpose of this study was to identify the effects of nitrogen (N) application rate on yield, quality, potassium (K) uptake and utilization of daylily (*Hemerocallis citrina* Baroni) in protected cultivation, to provide theoretical support for nutrient management techniques in protected cultivation.

【Methods】Experiments were conducted from 2015 to 2017 at the daylily experimental station of Jiangsu Academy of Agricultural Sciences (Dingzui Town, Suqian City, Jiangsu Province). The daylily cultivar used in the experiment was ‘Dawuzui’. Five application rates of N 0, 50, 100, 150 and 200 kg/hm² (expressed as N0, N50, N100, N150, N200) were designed. The yield, quality, K uptake and utilization of daylily were analyzed at the re-greening, bolting and budding stages. 【Results】The N application increased the K uptake at all growth stages, and the largest increment occurred during bolting to budding stage. Compared to N0, the K uptake with N50, N100, N150 and N200 treatments significantly increased by 21.0%, 67.6%, 86.0% and 103.8%, respectively.

收稿日期: 2018-05-30 接受日期: 2018-12-10

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(16)1022]资助。

联系方式: 张国伟 E-mail: zgw_0721@163.com; * 通信作者 刘瑞显 E-mail: liuruixian2008@163.co63.com

Nitrogen application also changed the ratio of K uptake at the monitoring stages. The ratio of K uptake decreased from re-greening to bolting stage, while increased from bolting to budding stage, and N200 showed the most significant effect among the treatments. Increase of N application rate alleviated the K decrease rate at budding stage, the *b* values obtained in the treatments of N50, N100, N150 and N200 were 0.0051, 0.0048, 0.0045, 0.0044 and 0.0042, respectively. As the N application rate increased, the marginal effect of K uptake (i.e. increased amount of K uptake by 1 kg increase of N application) increased first and then decreased, and the daylily production efficiency of K descended steadily. In the treatments of N100 and N150, the daylily dry matter accumulation was high and more K was allocated to the reproductive organs, and the dynamic characteristic parameters of K concentration and accumulation were more optimized, which was beneficial for the yield formation and higher contents of vitamin C, amino acids, soluble sugars, flavones, and polyphenols. In the treatment of N150, the marginal effect of K uptake and production efficiency decreased, while the content of colchicine reached the highest. In treatments N0 and N50, the yields reduced, and K accumulation and economic coefficient of biomass of daylily decreased significantly, compared with other treatments. **【 Conclusions 】** Under the tested condition, nitrogen application rate of 100–150 kg/hm² could promote the accumulation and transport of K, alleviate the decrease rate of K uptake in the later growth stage of daylily, thus beneficial to the formation of yield and quality related compounds as result.

Key words: daylily; nitrogen application rate; yield; quality; potassium uptake and utilization

金针菜又名黄花菜，是百合科萱草属多年生草本宿根植物，其花蕾具有较高营养价值，可健脑、抗衰、降胆固醇，是一种受消费者喜爱的药食同源蔬菜。长期以来，露天栽培金针菜技术存在产量低、品质差和上市晚等缺点，而金针菜设施栽培技术具有产量高、品质优和上市早等优点，推广面积逐年增大，但金针菜的施肥技术研究仍缺少系统性。相关研究表明，采用合适的品种和肥料调控措施，可以进一步提高设施栽培金针菜的产量和品质^[1-2]。

施氮是作物优质高产的重要调控措施，但是过量施入氮肥后，不仅降低氮素利用效率，还影响到钾的吸收和利用^[3-4]。钾在植物体内以 K⁺形态存在，具有较强的移动性，充足的钾供应可以提高植物叶片光合磷酸化效率，促进碳水化合物的合成和运输，钾营养不足则降低叶片中碳水化合物形成和养分向生殖器官的运输，用于生殖器官发育并形成碳水化合物的钾的减少是导致作物产量降低和品质变劣的主要因素之一^[5]，而氮和钾之间也存在互作效应，适量施氮可以促进钾的吸收，过量施氮则降低钾的肥料利用效率^[6]，此外，氮钾比例失调还可以影响植株体内激素平衡，降低自由基清除能力，进而降低产量^[7]。由于钾的上述生理功能，作物对钾的吸收、积累和分配特点关系到作物的产量形成与施肥技术的确定。大量研究认为植物生物量或养分累积特征符合 Logistic 模型，栽培措施对其累积模型的基本形态影响较小，但对最大累积速率、最大累积速

率出现时间和持续时间等特征值影响较大^[8-9]，因此可以通过分析模型的特征值来了解植物的养分吸收规律。

与露地栽培相比，设施栽培特殊的温度、光强和湿度会引起养分吸收和利用的差异。周玲玲等^[10]研究认为，与露地栽培相比，设施栽培提高了金针菜的产量与品质，但针对设施栽培金针菜钾吸收利用的研究尚未见报道。张国伟等^[11]研究认为合理施氮量可以提高大田作物钾的利用效率和产量。而对施氮量如何影响设施栽培金针菜钾吸收利用和产量品质形成仍需进一步研究。

本研究采用统计模型的方法研究施氮量对设施栽培金针菜钾吸收利用和产量品质形成的影响，以为设施栽培金针菜的养分管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2015 至 2017 年在江苏省宿迁市丁嘴镇 (118°56'E, 33°86'N) 江苏省农业科学院金针菜试验基地进行。供试土壤为粘质土，2015—2016 和 2016—2017 年试验地 0—20 cm 土层土壤 pH 值分别为 6.5 和 6.7、有机质 12.2 和 12.8 g/kg、全氮 1.08 和 1.12 g/kg、NH₄⁺-N 26.4 和 28.1 mg/kg、NO₃⁻-N 19.4 和 20.2 mg/kg、速效磷 36.2 和 34.5 mg/kg、速效钾 132.1 和 128 mg/kg。供试品种为江苏省特色品种‘大乌嘴’，2014 年 3 月起移植栽幼苗，覆盖反光地

膜并铺设滴灌带, 每穴 2 株, 设置行距 0.75 m, 株距 0.20 m, 折合密度 66700 穴/hm²。所用单体拱形大棚长 90 m、宽 6.0 m、高 2.5 m。设 N 0、50、100、150 和 200 kg/hm² 5 个施氮量, 氮肥在生育期中分两次施用, 其中基肥与薹肥施用比例 3 : 2, 全生育期 P₂O₅ 和 K₂O 用量分别均为 120 kg/hm² (磷钾肥施用量为该地区常规施用水平), 全部作为基肥, 所用肥料为尿素、磷酸二铵和硫酸钾。小区长 9 m, 宽 6 m, 重复 3 次, 随机区组排列, 采用膜下滴灌技术精确控制施肥量。其中棚膜于每年 12 月 5 日覆盖, 次年 5 月 1 日去除棚膜进入露天栽培方式。其它管理按当地高产栽培要求进行。

1.2 测定项目与方法

在盛蕾期时, 每个处理选取大小一致的花蕾 40 个测定蕾长、蕾宽和单蕾重, 之后低温保存测定花蕾品质性状, 采用考马斯亮蓝法测定蛋白质含量^[12], 采用硫酸蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[12], 福林酚比色法测定多酚含量^[12], 硝酸铝比色法测定总黄酮含量^[13], 磷钼杂多酸光度法测定 V_c 含量^[14], 茚三酮比色法测定游离氨基酸含量^[12], 原子吸收分光光度法测定钙含量^[12], 液相色谱法测定秋水仙碱含量^[15]。在开花末期统计单株花蕾数量, 计算理论产量。

分别于出苗 (3 月 1 日) 后 1、20、40、60、80、100、120 和 140 d 在每小区取生长发育一致的 1 穴植株, 3 次重复, 在 105℃ 杀青 30 min 后, 80℃ 烘至恒量, 称生物量。样品粉碎后用原子吸收分光光度法测定钾含量^[12], 再根据干物质质量计算钾积累量。

1.3 金针菜钾素累积特征值的计算方法

根据前人研究结果, 植物钾积累量的增长过程可用 Logistic 曲线进行模拟, 其基本模型为 $W = W_m / (1 + ae^{-bt})$ 。式中, W 为单株生物量, W_m 为单株生

物量理论最大值, t 为生长天数, a , b 均为参数。分别对模型求 1 阶、2 阶和 3 阶导数, 可得相应生长曲线的最快生长时段的起始时间 (t_1)、终止时间 (t_2)、最大相对生长速率 (V_m) 及其出现时间 (t_m), 最终可以计算出快速累积期持续时间 (T)^[16], 其中:

$$t_1 = \frac{1}{b} \ln \frac{2 + \sqrt{3}}{a}$$

$$t_2 = \frac{1}{b} \ln \frac{2 - \sqrt{3}}{a}$$

$$t_m = -\frac{\ln a}{b}$$

$$V_m = -\frac{bW_m}{4}$$

$$T = t_2 - t_1$$

1.4 生物量和钾经济系数、钾生产效率

生物量经济系数 = 蕾生物量/总生物量

钾经济系数 = 蕾的钾积累量/钾总积累量

钾吸收比例 = 不同生育阶段钾吸收量/收获期钾积累量 × 100%

钾生产效率 (kg/kg) = 产量/钾积累量

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 软件处理数据和作图, 用 SPSS 11.0 软件进行统计分析, 用 LSD 法 ($\alpha = 0.05$) 进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 施氮量对金针菜产量的效应分析

由图 1 可见, 随施氮量增加, 金针菜产量呈先上升后降低趋势, 且在 N 150~200 kg/hm² 时产量最高。金针菜产量的变化趋势可用二次曲线进行拟合, 对拟合方程求导可得到金针菜产量的边际产量

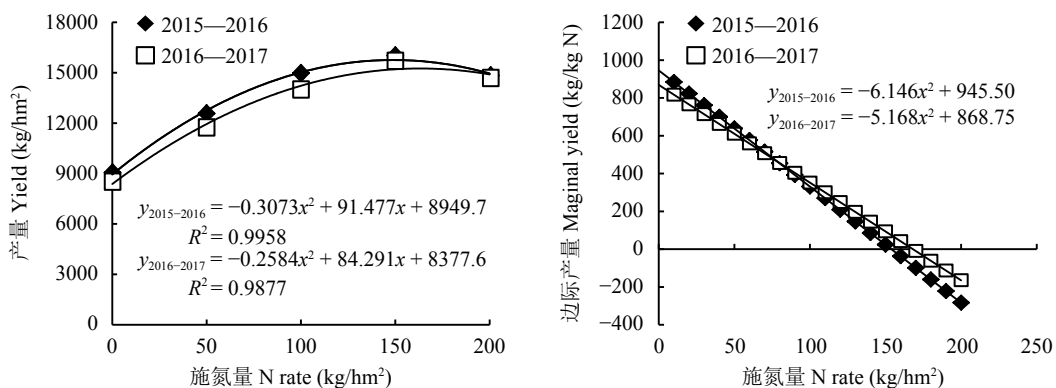


图 1 施氮量与金针菜产量与边际产量的关系

Fig. 1 Relationship between nitrogen application rate and yield and nitrogen marginal yield of daylily

变化曲线, 即每公顷增加 1 kg 氮量所增加的金针菜产量。当施 N 量为 153.8 kg/hm² (2015~2016) 和 167.9 kg/hm² (2016~2017) 时边际产量降低为零。

2.2 施氮量对金针菜花蕾性状的影响

由表 1 可知, 施氮量显著影响花蕾性状, 随施氮量增加, 花蕾长、花蕾宽和花蕾重显著增加, 在增加到一定程度时趋于稳定。单株花蕾数随施氮量增加呈先升高后降低趋势, 且在 N 100 或 150 kg/hm² 时最大。

2.3 施氮量对金针菜品质性状的影响

由表 2 可知, 施氮量显著影响金针菜品质, 随施氮量增加, 氨基酸和可溶性糖持续增加, 秋水仙碱含量在升高到一定程度后趋于稳定, V_c 和钙含量呈先增加后降低趋势, 且在 N 100 kg/hm² 时最高, 而多酚和黄酮含量则呈降低趋势。

2.4 施氮量对金针菜生物量和钾累积与分配的影响

随施氮量增加, 总生物量和总钾累积量持续增加, 而花蕾的生物量和钾累积量则在升高到一定程

表 1 不同施氮量下金针菜产量性状

Table 1 Yield traits of daylily under different N application rates

年份 Year	施氮量 (kg/hm ²) N rate	花蕾长 (mm) Bud length	花蕾宽 (mm) Bud width	单数花蕾数 Number of bud per plant	花蕾重 (g) Bud weight
2015—2016	0	101.4 d	8.88 b	25.3 d	2.64 c
	50	108.3 c	9.22 a	29.4 c	3.15 b
	100	112.1 b	9.31 a	34.1 ab	3.22 ab
	150	114.2 a	9.33 a	35.2 a	3.5 a
	200	114.9 a	9.34 a	33.2 b	3.47 a
2016—2017	0	102.3 d	8.76 b	26.3 c	2.58 c
	50	110.2 c	9.31 a	30.2 b	3.12 b
	100	113.1 b	9.33 a	33.8 a	3.32 ab
	150	115.1 a	9.41 a	34.5 a	3.48 a
	200	115.3 a	9.39 a	32.8 ab	3.39 ab

注 (Note): 同列数值后不同字母表示同一年份不同施氮量间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters within the same column mean significant difference at 0.05 level among different N rates in the same year.

表 2 施氮量对金针菜品质性状的影响

Table 2 Effects of nitrogen application rate on quality traits of daylily

年份 Year	施氮量 N rate (kg/hm ²)	V _c (μg/mg)	游离氨基酸 Free amino acid (μmol/mg, protein)	可溶性糖 Soluble sugar (mg/g, DW)	Ca (μg/g, FW)	多酚 Polyphenol (mg/g, FW)	黄酮 Flavone (mg/g, FW)	秋水仙碱 Colchicine (mg/g, FW)
2015—2016	0	5.60 b	58.86 c	430.73 c	48.26 c	4.01 a	15.31 a	0.41 c
	50	5.46 b	56.99 c	449.47 b	50.69 b	4.11 a	14.91 a	0.35 d
	100	7.24 a	62.85 b	454.31 b	54.18 a	3.19 b	13.28 b	0.58 b
	150	5.11 b	65.88 c	461.05 b	46.43 d	3.25 b	13.60 b	0.81 a
	200	3.88 c	69.56 a	482.73 a	42.96 e	3.04 c	10.76 c	0.85 a
2016—2017	0	5.21 c	54.67 c	417.82 d	50.24 c	4.05 a	16.47 a	0.46 c
	50	6.18 b	56.78 c	461.02 c	53.01 b	4.01 a	15.24 b	0.49 d
	100	7.32 a	62.12 b	467.33 bc	55.22 a	3.67 b	13.99 c	0.61 b
	150	6.11 b	66.27 c	474.34 ab	50.37 c	3.21 c	13.83 c	0.77 a
	200	4.37 d	68.93 a	478.51 a	46.82 d	2.89 d	11.82 d	0.81 a

注 (Note): 同列数值后不同字母表示同一年份不同施氮量间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters within the same column mean significant difference at 0.05 level among different N rates in the same year.

度后趋于稳定, 而生物量和钾的经济系数随施氮量增加呈先升高后降低趋势, 且在 N 50 kg/hm² 时达到最高 (表 3)。

2.5 施氮量对金针菜钾浓度和累积动态的影响

由图 2 可见, 随着施氮量增加, 植株钾浓度逐渐升高。不同施氮量下金针菜的钾浓度均随生育进程呈现先升高后降低趋势, 变化范围为 1.8%~2.8%, 对返青后 80 天后的钾浓度降低时段数据进行回归分析表明, 钾浓度随时间的变化趋势可以用负指数函数方程 ($y = ae^{-bx}$) 进行拟合。由表 4 可知, 随施氮量增加, 金针菜钾浓度衰减方程的 a 值 (初始值) 均持续升高, 即钾浓度升高; b 值 (下降速率) 呈现持续降低趋势。随着生育进程, 金针菜钾累积量的变化

符合 Logistic 生长曲线。数据拟合分析可得到钾累积动态模型的特征值 (表 5), 随施氮量增加, 最大累积速率持续增加, 而最大累积速率出现时间提前, 快速累积持续时间缩短。

2.6 施氮量对金针菜不同生育阶段钾吸收量和吸收比例的影响

随施氮量升高, 抽薹—现蕾期的钾吸收量呈升高趋势, 返青期和返青—抽薹期钾吸收量在升高到一定程度后趋于稳定。随施氮量增加, 钾吸收比例变化规律在不同生育期间差异较大, 返青期呈降低趋势, 返青—抽薹期呈先升高后降低趋势, 且在 N 100 kg/hm² 时最高, 抽薹—现蕾期则呈持续升高趋势 (表 6)。

表 3 施氮量对金针菜钾累积和分配的影响 (2016—2017)

Table 3 K accumulation and distribution of daylily plant under different nitrogen application rates

施氮量 (kg/hm ²) N rate	总累积量 (kg/hm ²) Total accumulation		花蕾累积量 (kg/hm ²) Accumulation in reproductive organ		经济系数 Economic coefficient	
	生物量 Biomass	K	生物量 Biomass	K	生物量 Biomass	K
	0	2703.00 e	26.35 e	936.86 d	10.32 c	34.66 b
50	2996.25 d	34.05 d	1198.80 c	15.84 b	40.01 a	46.52 a
100	3601.88 c	45.07 c	1440.03 b	19.06 a	39.98 a	42.30 b
150	3994.00 b	49.35 b	1527.71 a	19.21 a	38.25 a	38.93 c
200	4210.05 a	54.43 a	1505.93 a	19.23 a	35.77 b	35.33 d

注 (Note): 同列数值后不同字母表示不同施氮量间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters within the same column mean significant difference at 0.05 level among different N rates.

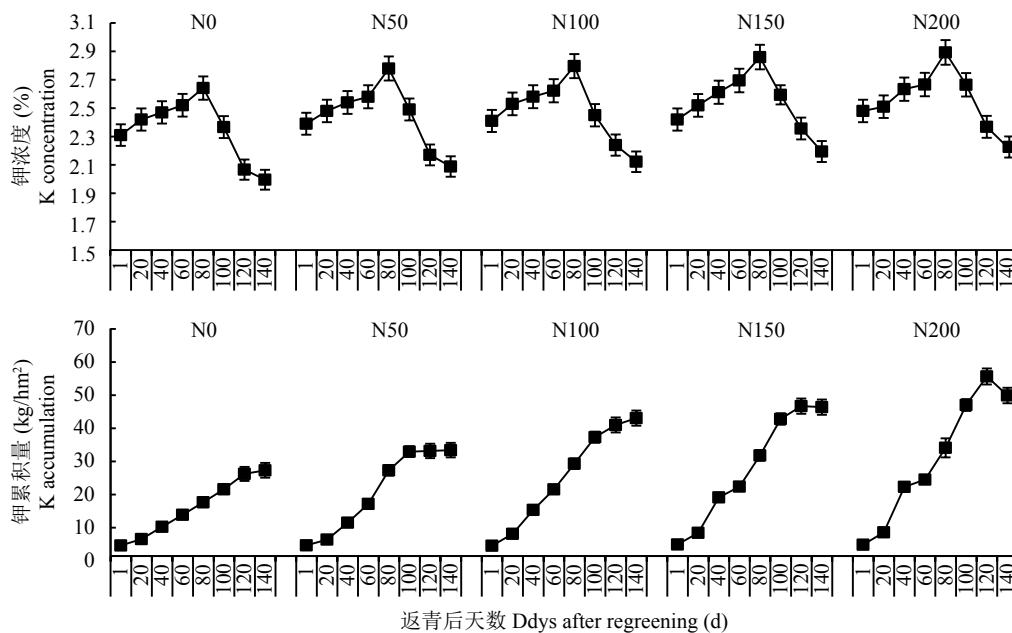


图 2 施氮量对金针菜植株钾浓度和钾累积量的影响 (2016—2017)

Fig. 2 Effects of nitrogen application rate on potassium concentration of daylily plant

表 4 不同施氮量下金针菜钾浓度拟合方程参数 (2016—2017)

Table 4 Parameters of fitting equations for K concentration of daylily under different N application rates

施氮量 (kg/hm ²) N rate	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
0	3.938	0.0051	0.9764*
50	3.984	0.0048	0.9445*
100	3.995	0.0045	0.9656*
150	4.061	0.0044	0.9572*
200	4.148	0.0042	0.9888**

注 (Note): *a*—钾浓度衰减方程初始值 Initial value of attenuation equation of potassium concentration; *b*—钾浓度衰减方程下降速率 Decreasing rate of attenuation equation of potassium concentration. *n* = 4, *R*_{0.05}² = 0.9024, *R*_{0.01}² = 0.9801. *—*P* < 0.05; **—*P* < 0.01.

表 5 施氮量对金针菜钾累积动态特征值的影响 (2016—2017)

Table 5 Effect of N application rate on eigenvalues of potassium accumulation models of daylily

施氮量 (kg/hm ²) N rate	<i>V</i> _{max} [kg/(hm ² -d)]	<i>t</i> _m (d)	<i>T</i> (d)
0	0.2199	76.1	94.39
50	0.3625	66.6	69.29
100	0.4409	65.3	66.50
150	0.4832	63.2	65.43
200	0.5601	62.1	64.89

注 (Note): *V*_{max}—最大累积速率 The maximal speed of K accumulation; *t*_m—最大累积速率出现时间 Time reaches the maximal rate of the accumulation; *T*—快速累积持续时间 Duration of fleetly accumulation.

表 6 不同施氮量下金针菜不同生育阶段钾吸收量和吸收比例 (2016—2017)

Table 6 K uptake and uptake percentage of daylily at different growth stages under different N application rate

施氮量 (N kg/hm ²) N rate	返青期 Re-greening stage		返青—抽薹期 Re-greening to bolting stage		抽薹—现蕾期 Bolting to budding stage	
	(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)	(%)
0	5.23 d	20.0 a	7.26 d	27.8 d	13.66 e	52.2 d
50	6.05 c	19.2 a	8.98 c	28.4 c	16.53 d	52.4 d
100	6.85 b	16.0 b	12.95 b	30.3 a	22.89 c	53.6 c
150	7.13 ab	15.4 bc	13.83 a	29.8 b	25.41 b	54.8 b
200	7.28 a	14.8 c	14.12 a	28.7 c	27.84 a	56.5 a

注 (Note): 同列数值后不同字母表示不同施氮量间差异显著 (*P* < 0.05) Values followed by different letters within the same column mean significant difference at 0.05 level among different N rates.

2.7 施氮量对金针菜钾吸收量和钾吸收边际效应的影响

随施氮量增加, 金针菜钾吸收量变化规律可用 Logistic 方程拟合 (图 3), 通过对方程求导可以得出

氮对钾吸收的边际效应 (每增施 1 kg 氮促进钾的吸收量)。可以看出, 随着施氮量的增加, 钾吸收的边际效应呈先升高后降低趋势, 在施氮量为 32.5 kg/hm² 时达到最大。

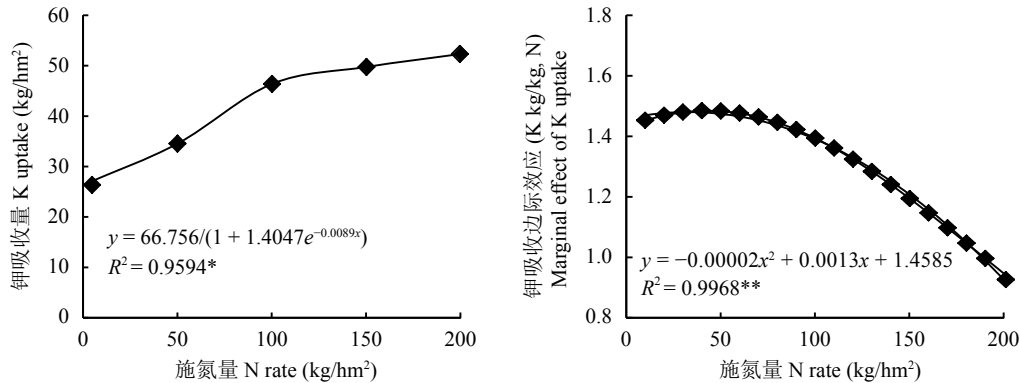


图 3 施氮量对金针菜植株钾累积量的影响 (2016—2017)

Fig. 3 Effects of N application rate on K accumulation amount of daylily plant

2.8 钾吸收量对金针菜产量和生产效率的影响

金针菜产量对钾吸收量的响应可用二次曲线拟合, 最高产量时理论钾量为 53.0 kg/hm^2 。对二次

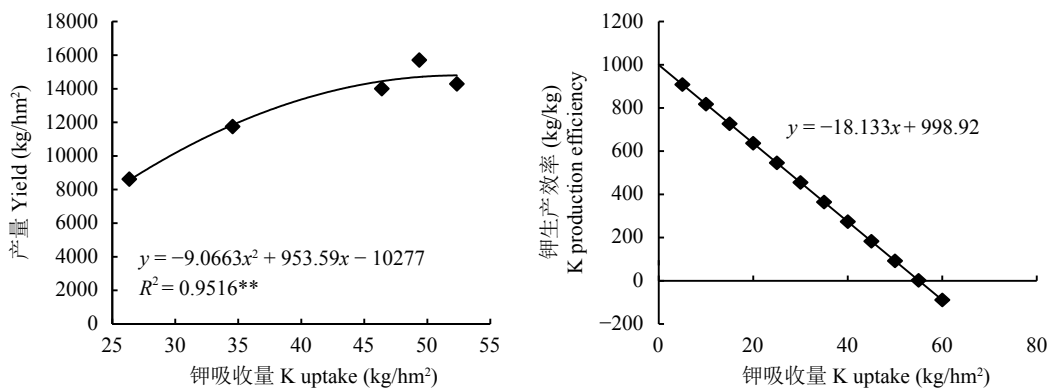


图 4 钾吸收量与金针菜产量和钾生产效率的关系 (2016—2017)

Fig. 4 Relationship of between daylily potassium accumulation and yield and production efficiency of potassium

3 讨论

合理施氮是调控作物生长发育和产量形成的重要措施之一, 本研究中, 随施氮量升高, 金针菜产量和钾吸收的边际效应均呈先升高后降低趋势, 基于产量最高和最大钾吸收边际效应的的施氮量分别在 $N 153 \sim 167 \text{ kg/hm}^2$ 和 32.5 kg/hm^2 , 这表明在金针菜理论产量最高时, 钾吸收的边际效应已经开始降低, 这与张国伟等^[11]在棉花上的研究一致。兼顾生产和环境因素效益, 本研究认为该地区 (苏北徐淮地区) 适宜施氮量为 $100 \sim 150 \text{ kg/hm}^2$, 该水平显著低于赵晓玲等^[17]在甘肃庆阳地区的推荐量为 $N 276 \text{ kg/hm}^2$, 其原因可能与庆阳地区采用露地栽培模式, 且土壤贫瘠, 保肥保水能力较差, 肥料利用率较低有关。

花蕾长和宽、花蕾重是金针菜主要的产量性状指标, V_c 、游离氨基酸、可溶性糖、钙和黄酮含量是金针菜的主要品质指标, 而秋水仙碱是引起金针菜中毒的关键指标。本研究中随施氮量增加尽管花蕾长和宽及花蕾重呈增加趋势, 但是单株花蕾数在施肥量高于 150 kg/hm^2 时显著降低, 导致产量降低。此外, 随施氮量增加, V_c 和钙含量呈先增加后降低趋势, 且在 $N 100 \text{ kg/hm}^2$ 时最高, 而秋水仙碱含量呈增加趋势, 且在达到一定程度后趋于稳定, 这与付开聪等^[18]认为氮、磷和钾缺乏导致秋水仙碱含量降低的研究相符, 多酚和黄酮含量随施氮量升高呈降低趋势, 也与藏小云等^[19]认为氮肥过多可以诱导荞麦叶片黄酮含量降低的研究相符, 其原因可能与高氮诱导苯丙氨酸解氨酶活性显著降低阻碍黄酮合

成有关^[20]。植株中养分向生殖器官的运输与产量和品质形成密切相关^[11], 本研究中, 随施氮量增加总生物量和总钾累积量持续增加, 但是生物量经济系数和钾经济系数呈先升高后降低趋势, 表明适量施氮可以促进干物质和钾分布于花蕾, 而过量施氮则导致干物质和钾分布于营养器官, 这也与前人在棉花^[21]和马铃薯^[22]的研究一致。

植物体内钾参与众多代谢过程, 棉株中钾浓度的变化与碳水化合物的形成和养分向生殖器官的运输密切相关。本研究表明, 随生育进程, 金针菜抽薹后 (返青 80 d 后) 的钾浓度变化可用负指数函数方程拟合, 随施氮量增加, 钾浓度衰减方程的 a 值 (初始值) 均持续升高, 即钾浓度升高, 而 b 值 (下降速率) 呈现持续降低趋势, 表明施氮降低了金针菜生育后期钾浓度的下降速率。进一步分析表明, 随施氮量增加, 钾累积量变化曲线的最大累积速率持续增加, 而最大累积速率出现时间提前, 快速累积持续时间缩短, 这说明施氮改变了钾的累积特征, 低氮处理下尽管钾的快速累积时间相对较长, 但是最大累积速率较低, 最大累积速率出现时间较迟, 最终植株矮小, 钾总累积量偏低, 高氮处理下金针菜植株的最大累积速率出现时间较早, 利于搭建丰产架子, 尽管快速累积持续时间偏短, 但是最大累积速率较大, 最终抽薹和现蕾相对集中, 钾的总累积量较高。植株钾的吸收随施氮量的动态变化可用 Logistic 曲线描述^[23], 对其求导可以得到氮对钾吸收的边际效应。本研究中, 随施氮量增加, 氮对钾吸

收的边际效应呈先升高后降低趋势，而钾吸收的生产效率则呈直线降低趋势，这也说明高氮处理下金针菜植株钾的吸收效率和生产效率均较低。

金针菜生育前期吸收的钾主要是促进营养器官生长，后期吸收的钾则对产量和品质形成至关重要。本研究中施氮量过低增加了抽薹期之前钾的吸收比例，降低了抽薹—现蕾期的钾吸收比例，导致后期钾供应不足，进而影响品质形成；过量施氮虽然增加了金针菜抽薹—现蕾期钾的吸收比例，使抽薹—现蕾期钾的浓度和吸收量显著增加，但是过高钾浓度反馈促进了氮的吸收，导致金针菜营养生长过旺，降低肥料利用效率。

4 结论

在施氮量 N 100~150 kg/hm² 范围内，干物质和钾素在花蕾中的分配比例较高，钾含量和累积量协调，利于高产形成。施氮量高于 N 150 kg/hm² 导致金针菜产量增幅下降，钾吸收的边际效应和钾的生产效率较低；施氮量低于 N 100 kg/hm² 降低干物质和钾累积量，不利于高产形成。综合考虑产量、品质和钾的吸收利用规律，推荐 N 100~150 kg/hm² 为苏北徐淮地区设施栽培金针菜最优施氮量。

参考文献:

[1] 丁新天, 朱静坚, 丁丽玲, 等. 大棚黄花菜生长特点及优质高效栽培技术研究[J]. *中国农学通报*, 2004, 20(1): 83–85.
Ding X T, Zhu J J, Ding L L, *et al.* Study of growth characteristics and high quality and efficient cultivation technology of greenhouse daylily[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(1): 83–85.

[2] 段金省, 李宗葵, 周忠文. 保护地栽培对黄花菜生长发育的影响[J]. *中国农业气象*, 2008, 29(2): 184–187.
Duan J S, Li Z Y, Zhou Z W. Influence of protected cultivation on growth and development of citron daylily (*Hemerocallis citrina*)[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29(2): 184–187.

[3] Dong H Z, Kong X Q, Li W J, *et al.* Effects of plant density and nitrogen and potassium fertilization on cotton yield and uptake of major nutrients in two fields with varying fertility[J]. *Field Crops Research*, 2010, 119(1): 106–113.

[4] Reid J B, Trollove S N, Tan Y, *et al.* Nitrogen or potassium preconditioning affects uptake of both nitrate and potassium in young wheat (*Triticum aestivum*)[J]. *Annals of Applied Biology*, 2016, 168(1): 66–80.

[5] Hu W, Lü X, Yang J, *et al.* Effects of potassium deficiency on antioxidant metabolism related to leaf senescence in cotton (*Gossypium hirsutum*, L.)[J]. *Field Crops Research*, 2016, 191: 139–149.

[6] 汪顺义, 刘庆, 史衍玺, 等. 氮钾配施对甘薯光合产物积累及分配的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(14): 2706–2716.

Wang S Y, Liu Q, Shi Y X, *et al.* Interactive effects of nitrogen and potassium on photosynthesis product distribution and accumulation of sweet potato[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(14): 2706–2716.

[7] 何萍, 金继运. 氮钾营养对春玉米叶片衰老过程中激素变化与活性氧代谢的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(4): 289–296.
He P, Jin J Y. Effect of N and K nutrition on changes of endogenous hormone and metabolism of active oxygen during leaf senescence in spring maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(4): 289–296.

[8] Overman A R, Sanderson M A, Jones R M. Logistic response of bermudagrass and bunchgrass cultivars to applied nitrogen[J]. *Agronomy Journal*, 1993, 85: 541–545.

[9] 孙向丽, 张启翔. 一品红生物量及对水分、养分吸收利用的变化规律[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(6): 1191–1200.
Sun X L, Zhang Q X. Study on the biomass and regularity of absorption and utilization of water and nutrition in *Euphorbia pulcherrima*[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(6): 1191–1200.

[10] 周玲玲, 张黎杰, 姜若勇. 设施和露地栽培对金针菜产量和品质的影响[J]. *上海农业学报*, 2017, 33(3): 105–108.
Zhou L L, Zhang L J, Jiang R Y. Effects of protected and open cultivations on yield and quality of daylily[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2017, 33(3): 105–108.

[11] 张国伟, 杨长琴, 刘瑞显, 等. 施氮量对麦后直播棉钾素吸收利用的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(10): 3228–3236.
Zhang G W, Yang C Q, Liu R X, *et al.* Effects of nitrogen application rate on potassium uptake and utilization of direct-seeded cotton after wheat harvest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(10): 3228–3236.

[12] 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 66–218
Li H S, Sun Q, Zhao S J, *et al.* The experiment principle and technique on plant physiology and biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 66–218.

[13] 何书美, 刘敬兰. 茶叶中总黄酮含量测定方法的研究[J]. *分析化学*, 2007, 35(9): 1365–1368.
He S M, Liu J L. Study on the determination method of flavone content in tea[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2007, 35(9): 1365–1368.

[14] Liu H, Cao J, Jiang W. Evaluation and comparison of vitamin C, phenolic compounds, antioxidant properties and metal chelating activity of pulp and peel from selected peach cultivars[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 63: 1042–1048.

[15] Al-Fayyad M, Alali F, Alkofahi A, *et al.* Determination of colchicine content in *Colchicum hierosolymitanum* and *Colchicum tunicatum* under cultivation[J]. *Natural Product Letters*, 2002, 16: 395–400.

[16] 邹芳刚, 郭文琦, 王友华, 等. 施氮量对长江流域滨海盐土棉花氮素吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(5): 1150–1158.
Zou F G, Guo W Q, Wang Y H, *et al.* Effects of nitrogen application rate on the nitrogen uptake and utilization of cotton grown in coastal saline fields of Yangtze River Valley[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(5): 1150–1158.

[17] 赵晓玲. 庆阳金针菜优势产区区划及配套栽培技术研究[D]. 杨凌:

- 西北农林科技大学硕士学位论文, 2005.
- Zhao X L. Study on the advantageous regional planning and planting technology of common yellow daylily in Qingyang City[D]. Yangling: MS Thesis of Northwest Agriculture and Forestry University, 2005
- [18] 付开聪, 许明, 杨礼攀. 氮、磷、钾对嘉兰植株生长和秋水仙碱含量的影响[J]. *中国中药杂志*, 2000, 25(3): 144–145.
- Fu K C, Xu M, Yang L P. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on plant growth and colchicine content in Jialan[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2000, 25(3): 144–145.
- [19] 臧小云, 刘丽萍, 蔡庆生. 不同供氮水平对荞麦茎叶中黄酮含量的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2006, 29(3): 28–32.
- Zang X Y, Liu L P, Cai Q S. Effect of nitrogen supply on flavone and rutin accumulation in stems and leaves of common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench)[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2006, 29(3): 28–32.
- [20] 卢丽兰, 杨新全, 王彩霞, 等. 不同硝铵比氮素供应对广藜香生长及药效成分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5): 1314–1325.
- Lu L L, Yang X Q, Wang C X, *et al.* Effects of nitrogen supply with different $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ ratios on growth and medicinal components of *Pogostemon cablin*[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(5): 1314–1325.
- [21] 邹芳刚, 张国伟, 王友华, 等. 施氮量对滨海改良盐土棉花钾累积利用的影响[J]. *作物学报*, 2015, (1): 80–88.
- Zou F G, Zhang G W, Wang Y H, *et al.* Effect of nitrogen application amounts on uptake and utilization of potassium in cotton grown in improved coastal saline land regions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, (1): 80–88.
- [22] 井涛, 樊明寿, 周登博, 等. 滴灌施氮对高垄覆膜马铃薯产量、氮素吸收及土壤硝态氮累积的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 654–661.
- Jing T, Fan M S, Zhou D B, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on potato tuber yield, N uptake and soil NO_3^- -N accumulation under plastic mulching with drip irrigation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3): 654–661.
- [23] 李伶俐, 房卫平, 谢德意, 等. 施氮量对杂交棉干物质积累、分配和氮磷钾吸收、分配与利用的影响[J]. *棉花学报*, 2010, 22(4): 347–353.
- Li L L, Fang W P, Xie D Y, *et al.* Effects of nitrogen application rate on dry matter accumulation and N, P, K uptake and distribution in different organs and utilization of hybrid cotton under high-yield cultivated condition[J]. *Cotton Science*, 2010, 22(4): 347–353.