

控释尿素配施控释氯化钾对土壤肥力和牡丹生长的影响

赵晨浩^{1,2}, 李泽丽¹, 张强², 李磊³, 孟伦⁴, 刘之广^{1,2}, 张民^{1,2}

(1.土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院,

山东 泰安 271018; 2.养分资源高效开发与综合利用国家重点实验室, 金正大生态工程集团股份有限公司, 山东 临沭 276700; 3.兰陵农垦实业总公司, 山东 兰陵 277700; 4.山东狮克现代农业投资有限公司, 山东 菏泽 274000)

摘要: 通过研究控释尿素和控释氯化钾配施对土壤供肥能力和牡丹生长的影响, 为牡丹大范围种植中控释肥替代传统化肥提供理论依据。以农民习惯普通尿素配施氯化钾基肥加追肥 2 次的处理为对照, 通过大田试验, 研究不同用量控释尿素 (135, 270, 405 kg/hm²) 和控释氯化钾 (90, 180, 270 kg/hm²) 交互一次性施肥对土壤养分供应能力和“黄翠羽”品种牡丹 (*Paeonia suffruticosa* Andr.) 生长的影响。结果表明: 25℃ 静水浸提条件下, 控释尿素和控释肥氯化钾的累积养分释放率分别在 84, 112 天达到 80%, 养分持续供应能力显著高于普通氮钾肥。等施肥量下控释肥处理较农民习惯施肥显著提高 0—20 cm 土层土壤硝态氮含量 68.0%~157.8%, 铵态氮含量 46.6% 和速效钾含量 16.1%~122.6%; 提高了牡丹株高 8.6%、茎粗 25.3% 和单株花数 25.1%。控释氮钾配施对土壤硝态氮含量、牡丹叶片净光合速率、胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率具有显著交互作用。试验条件下优选的控释尿素和控释氯化钾用量分别为 270, 90 kg/hm²。一次性基施控释尿素和控释氯化钾较习惯施肥省时省工, 提高土壤肥力, 促进牡丹生长, 在牡丹种植中具有较高的推广价值。

关键词: 施肥方式; 牡丹; 控释尿素; 控释氯化钾

中图分类号: S158.3; S685.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)04-0312-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.045

Effects of Controlled-Release Nitrogen and Controlled-Release Potassium on Soil Fertility and the Growth of Peony (*Paeonia suffruticosa* Andr.)

ZHAO Chenhao^{1,2}, LI Zeli¹, ZHANG Qiang², LI Lei³,

MENG Lun⁴, LIU Zhiguang^{1,2}, ZHANG Min^{1,2}

(1.Engineering Laboratory for Tranlin Fulvic Acid Based Fertilizer of Shandong Agricultural University, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Recourses and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018;

2.State Key Laboratory of Nutrition Resources Integrated Utilization, Kingenta Ecological Engineering Group Co., Ltd., Linshu, Shandong 276700; 3.Lanling Agricultural Reclamation Industrial Parent Company, Lanling, Shandong 277700; 4.Shandong Shike Modern Agricultural Investment Co., Ltd., Heze, Shandong 274000)

Abstract: In order to study the effects of the combined application of controlled-release urea (CRU) and controlled-release potassium chloride (CRK) on soil fertility and peony growth, and provide a theoretical basis for the controlled-release fertilizer (CRF) to replace traditional chemical fertilizers in peony large-scale cultivation, field experiments were arranged, normal urea with potassium chloride base-fertilizer and top-dressing which used by farmers was set as a control, fertilizers with different dosage of CRU (135, 270, 405 kg/hm²) and CRK (90, 180, 270 kg/hm²) were chosen, the effects of interactive one-time fertilization on soil nutrient supply capacity and peony growth of “Huang Cuiyu” variety were studied. The results showed that the cumulative nitrogen release rate of CRU reached 80% at 84 days in 25℃ still water extraction, and the release rate of CRK reached 80% at 112 days, which had superior stable and sustainable nutrient supply capacity. With the same amount of fertilization, compared with farmers' customary fertilization (Control), the content of nitrate

收稿日期: 2019-11-26

资助项目: 山东省重点研发计划项目 (2018GNC110001); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0200706); 山东省研究生导师指导能力提升项目 (SDYY18108)

第一作者: 赵晨浩 (1992—), 男, 在读博士研究生, 主要从事植物营养和新型肥料研究。E-mail: zhaochenhao1992@foxmail.com

通信作者: 张民 (1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤肥料研究。E-mail: minzhang-2002@163.com

刘之广 (1987—), 男, 副教授, 主要从事土壤肥料研究。E-mail: liuzhiguang8235126@126.com

nitrogen, ammonium nitrogen, and available potassium in soil 0—20 cm soil layer was significantly increased by 68.0%~157.8%, 46.6%, and 16.1%~122.6%; the same amount of CRF treatment increased the peony plant height by 8.6%, the stem diameters were increased by 25.3%, the flowers per plant number increased by 25.1%. The CRU and CRK treatments had a significant interaction influence for the soil nitrate nitrogen content, peony leaves net photosynthetic rate, intercellular carbon dioxide concentration, and transpiration rate. The optimal amounts of CRU and CRK fertilization of this study were 270 and 90 kg/hm², respectively. One-time application of CRU and CRK saves time and labor compared with customary fertilization, improves soil fertility, and promotes peony growth, which has higher promotion value in peony planting.

Keywords: fertilization method; peony; controlled-release urea; controlled-release potassium chloride

随着国家经济发展和人民生活水平的提高,花卉消费占比越来越高;由于花卉植物具有需肥量大、吸肥强度高的特点,因此随着中国花卉业的整体提升,带动了花卉肥料业的升级和进步。合理施肥不仅能够提高花卉品质,而且对改善环境也起着至关重要的作用^[1]。牡丹(*Paeonia suffruticosa* Andr.)是一种典型观赏性花卉,具有特殊的肉质根结构和养分优先供给开花的习性^[2]。张利霞等^[3]研究表明,适量增施氮肥可显著提高牡丹生长势、株高和叶片发育程度,促进牡丹花芽形成;黄伟等^[4]研究表明,合理施用钾肥能显著促进植物现蕾和开花;张丽萍等^[5]研究表明,药用牡丹在7月之前为地上部生长期,7月后地下部增重显著,植株养分占比为氮素最高,钾素次之,磷素最低;魏冬峰等^[6]研究表明,氮磷钾中任意两因素配施均会影响牡丹生长,3种肥料的影响作用大小顺序为钾肥>氮肥>磷肥。因此,氮钾的合理供给是牡丹栽培的关键,但是牡丹多年持续生长所需养分在传统施肥方式里由多次追肥提供,不但增加了人工成本,多次施肥也会带来肥料利用率低和环境风险等问题。

控释肥是一种新型肥料,能长期、稳定、均衡地给植物供给养分,不仅可以有效提高养分利用率,而且具有降低人工成本和减少环境污染等优点。Sui等^[7]采用¹⁵N标记的控释尿素在小麦玉米轮作系统上研究了氮素的去向,结果表明控释尿素可有效减少氮素向深层土壤迁移,改进向作物分配的比例;Geng等^[8]研究表明,控释尿素较普通尿素的供氮规律更贴合小麦和玉米的需求规律,显著降低了氮素淋溶,提高了氮素利用率,进而显著提高了小麦和玉米产量;Zheng等^[9]研究表明,普通尿素掺混一定量的控释尿素,可以显著减少氮损失,提高小麦玉米产量,并增加种植利润;Zhang等^[10]研究发现,控释尿素应用于水稻,可以显著减少氮素流失,提高氮素利用率,并提高水稻产量;Tian等^[11]研究发现,控释尿素可以减少棉花的氨挥发和硝酸盐淋洗,从而提高棉花产量,并且提高蒜棉套种模式的大蒜产量^[12],另外施用控释钾肥可以提高棉花的钾素吸收量和叶片光合能力,进而

提高棉花产量^[13]。在粮棉作物上,控释肥具有显著的优越性,但是在同样需肥的多年生花卉作物上,几乎没有应用经验。

本研究结合牡丹原产地山东省菏泽市土壤养分状况,采用成本较低的包膜控释尿素与包膜控释氯化钾配合施用,研究了控释氮钾肥与普通施肥方式分别对土壤养分供应能力、牡丹生长特性的影响,为牡丹的大范围种植及园林花卉领域科学、合理地施用控释肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验开展于2015年10月至2016年11月在山东菏泽牡丹区黄堽镇(115°32′04″E, 35°21′05″N)进行,供试土壤在中国土壤系统分类中为弱盐淡色潮湿维形土(Parasalic Ochri-Aquic Cambosols),发生分类中为盐化潮土,其基本理化性质为:砂粒、黏粒和粉粒含量分别为21.9%、9.7%和68.4%,质地为粉壤土,全盐含量0.12%,游离CaCO₃含量11.4%,有机质含量10.89 g/kg,全氮含量0.89 g/kg, pH 8.08(水土比2.5:1),电导率217.3 μS/cm(水土比5:1, 25℃), NO₃⁻-N含量17.3 mg/kg, NH₄⁺-N含量8.5 mg/kg,有效磷含量18.6 mg/kg,速效钾含量109.4 mg/kg。

供试牡丹(*Paeonia suffruticosa* Andr.)品种为“黄翠羽”,皇冠型,花淡黄色,半开展中高株型,菏泽赵楼牡丹园1983年育出^[14];采用2014年9月嫁接种植的幼苗,未施肥生长1年后(2015年10月)施入基肥进行试验。供试肥料为普通尿素(N 46%),普通氯化钾(K₂O 60%),山东农业大学土肥资源高效利用国家工程实验室缓控释肥中试基地生产的聚氨酯包膜尿素(N 43.5%;设计25℃静水释放期为90天)及生物基包膜氯化钾(K₂O 57.3%;设计25℃静水释放期为90天),磷肥采用过磷酸钙(P₂O₅ 15%),施肥方式为沟施,即行间开深约15~20 cm、宽约20 cm的沟槽,将每小区肥料混匀后,均匀撒入沟底,再将挖出的土壤覆回,并踩过压实。

1.2 试验方法

将农民习惯施肥设置为对照处理,采用 3 个水平的控释尿素与控释氯化钾的二因素三水平的完全交互设计,以农民施用习惯施氮、钾量作为 2 水平,2 水平的减量 50%为 1 水平,增量 50%作为 3 水平,共 10 个处理(表 1):(1)农民习惯施肥对照处理(CK);(2)低氮低钾处理(N1K1);(3)低氮中钾处理(N1K2);(4)低氮高钾处理(N1K3);(5)中氮低钾处理(N2K1);(6)中氮中钾处理(N2K2);(7)中氮高钾处理(N2K3);(8)高氮低钾处理(N3K1);(9)高氮中钾处理(N3K2);(10)高氮高钾处理(N3K3)。各处理设 3 次重复,共计 30 个小区,每个小区长宽均为 5 m,每小区牡丹行距 100 cm,株距 50 cm,每个小区共 50 株。CK 处理氮钾肥的 50%作为基肥于 10 月施入,25%为翌年 2 月(幼蕾期前)追肥,25%为翌年 7 月(叶片生长期后,鳞芽分化期前)追肥,控释肥处理的所有氮钾肥和所有 10 个处理的磷肥于 2015 年 10 月一次性基施。

表 1 各处理施肥量				单位:kg/hm ²
处理	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	备注
CK	270	225	180	农民习惯施肥
N1K1	135	225	90	低氮低钾
N1K2	135	225	180	低氮中钾
N1K3	135	225	270	低氮高钾
N2K1	270	225	90	中氮低钾
N2K2	270	225	180	中氮中钾
N2K3	270	225	270	中氮高钾
N3K1	405	225	90	高氮低钾
N3K2	405	225	180	高氮中钾
N3K3	405	225	270	高氮高钾

1.3 研究方法

1.3.1 控释肥料释放特征测定 控释尿素与控释氯化钾的释放特征按照行业标准《控释肥料》(HG/T 4215—2011)^[15]规定的静水养分浸提法测定。累积养分释放率计算方法:控释肥料养分在一段时期内的连续释放累积量占该养分总量的质量分数。

1.3.2 田间调查及土壤、鲜花样品采集方法 于幼蕾期(2016 年 3 月 20 日)、开花期(2016 年 4 月 9 日)、叶片生长期(2016 年 6 月 20 日)、鳞芽分化期(2016 年 8 月 18 日)与落叶期(2016 年 10 月 17 日)^[2,16]进行田间调查,每小区选取中间 4 行内长势平均的 10 株牡丹,采用卷尺测定牡丹株高,游标卡尺测定牡丹茎粗。同时每小区的牡丹行间与株间各随机取 2 点,用内径 4.5 cm 土钻取 0—20 cm 土样,分别混匀后用四分法取适量土样装袋,风干研磨后过 2 mm 筛。于盛花期每小区选取并标记 3~5 株单株花数等于小区平均花数的植株,次日上午 8:00—8:

30 采集标记植株的即将盛开的牡丹花朵,用自封袋密封并装入冰盒中,带回实验室分析化验。

1.3.3 样品测定及价格评估 采用 0.01 mol/L CaCl₂浸提后用 AA3 流动注射分析仪测定硝铵态氮含量;采用乙酸铵提取—火焰光度计法测定速效钾含量;采用便携式光合仪(LI—COR 公司,LI—6400,美国)测定叶片生长期的植株叶片净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度、蒸腾速率等光合指标。取样当天下午进行鲜花称重,取同一部位约 0.5 g 的花瓣以含 1% 盐酸的甲醇溶液研磨提取,并在 600,530 nm 比色,以 $\Delta A_{530nm-600nm}=0.1$ 作为 1 个总花色素苷单位,采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[17-18]。

1.4 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 和 Sigma Plot 12.5 软件进行数据归纳整理和作图,采用 SAS 8.0 统计软件采用 ANOVA 方差分析,不同处理间采用 Duncan 法检验各处理平均数在 $P\leq 0.05$ 水平的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 控释尿素和控释氯化钾的养分释放曲线

在 25℃ 静水浸提条件下,氮素和钾素的累积释放曲线呈现相似规律。氮素前 14 天为养分释放的迟滞期,14~84 天为养分加速释放的线性期,84~168 天为养分释放速率减慢的减衰期。氮素释放率在 84 天时达到 80%。钾素前 14 天为养分缓慢释放的迟滞期,随后 21~112 天为养分加速释放的线性期,112~168 天为养分减速释放的减衰期。在 112 天,钾素累积释放率为 80%(图 1)。

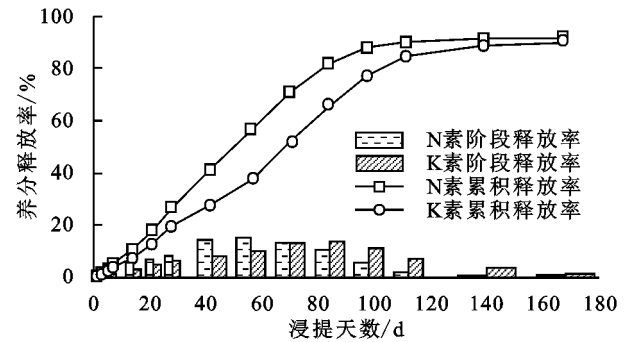


图 1 控释尿素和控释氯化钾在 25℃ 静水浸提条件下的养分释放特征曲线

2.2 控释尿素和控释氯化钾配施对土壤中硝、铵态氮和速效钾含量的影响

在幼蕾期和鳞芽分化期,施 N 水平对土壤 0—20 cm 土层的确态氮含量具有显著影响,N3 水平较 N1 水平显著增高,与 N2 水平的差异不显著。施 K 水平对各时期土壤 0—20 cm 土层的确态氮含量影响不显著。除开花期外,氮、钾配施均具有显著的交互作用。

不同控释肥处理和农民习惯施肥处理的 0—20 cm 土层的土壤硝态氮含量表现出显著差异,其中控释尿素配施控释氯化钾的各处理土壤表层硝态氮含量随牡丹生长表现出不断降低的趋势,农民习惯施肥分别在鳞芽分化期 0—20 cm 土层硝态氮含量升高。在相同施肥量下,控释肥处理(N2K2)较农民习惯施肥处理在整个生育期内提高了土壤硝态氮含量 68.0%~157.8%。在控释肥处理中,等施氮量条件下,随着施钾量的提高,0—20 cm 土层硝态氮含量在不同生育期不同,幼蕾期和开花期表现为先增加后降低的趋势,叶片生长期和鳞芽分化期除 N2 水平外其余施钾量对土壤硝态氮含量的影响差异不显著(表 2)。

表 2 不同施肥处理的 0—20 cm 土层 NO ₃ ⁻ -N 含量					
单位:mg/kg					
处理	幼蕾期	开花期	叶片 生长期	鳞芽 分化期	落叶期
N1	70.7b	9.6a	14.1b	13.6b	14.2a
N2	107.3ab	19.7a	19.7ab	20.3a	12.3a
N3	144.8a	13.8a	22.1a	23.1a	16.0a
K1	86.9a	12.5a	17.7a	18.8a	13.8a
K2	127.8a	17.0a	19.0a	20.0a	15.6a
K3	108.1a	13.6a	19.2a	18.2a	13.0a
CK	54.3e	16.9bc	11.7e	13.3c	12.7de
N1K1	44.0e	9.8f	15.4d	14.8c	11.6de
N1K2	94.0c	7.0g	12.7e	12.1c	17.1ab
N1K3	74.0d	12.0ef	14.3d	13.8c	13.8cd
N2K1	72.7d	12.8ed	14.2d	18.1b	14.3bc
N2K2	140.0a	28.4a	25.1a	24.5a	10.4e
N2K3	109.2b	18.0b	19.9c	18.2b	12.1de
N3K1	144.0a	15.0cd	23.6b	23.4a	15.4bc
N3K2	149.3a	15.7cb	19.3c	23.3a	19.3a
N3K3	141.0a	10.7ef	23.4b	22.7a	13.2cd
P _N	0.0277	0.1224	0.0780	0.0055	0.3033
P _K	0.4889	0.7100	0.9353	0.9213	0.5769
P _{N×K}	<0.0001	0.5193	<0.0001	<0.0001	0.0011

注:同组同列平均值后标有相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$);
 P_N 、 P_K 和 $P_{N\times K}$ 分别表示施氮水平、施钾水平和单价交互水平的
差异性检验值, $P<0.05$ 表示差异性显著。下同。

不同施氮水平对各生育期土壤 0—20 cm 土层的铵态氮含量影响不显著;在幼蕾期,随施钾水平的增加,土壤表层铵态氮含量呈现先增加后降低的趋势,K2 水平的土壤表层铵态氮含量最高,较 K1、K3 水平分别显著增加 27.9%和 31.7%;在其他生育期施钾水平对土壤铵态氮含量的影响不显著,且氮钾施用量之间无明显交互作用。控释肥处理和农民习惯施肥处理 0—20 cm 土层的土壤铵态氮含量随牡丹生长表现出不断降低的趋势,幼蕾期等量控释肥处理(N2K2)较农民习惯施肥处理(CK)显著提高了 0—20 cm 土层中 NH_4^+-N 含量 46.6%,其他生育期内差异不显著(表 3)。

表 3 不同施肥处理的 0—20 cm 土层 NH ₄ ⁺ -N 含量					
单位:mg/kg					
处理	幼蕾期	开花期	叶片 生长期	鳞芽 分化期	落叶期
N1	14.9a	6.3a	4.7a	3.9a	2.2a
N2	15.7a	6.2a	4.7a	3.8a	2.1a
N3	16.1a	6.2a	4.5a	3.6a	2.4a
K1	14.3b	6.6a	4.4a	3.4a	2.2a
K2	18.3a	5.6a	4.8a	4.0a	2.2a
K3	14b	6.4a	4.6a	3.9a	2.3a
CK	11.6e	6.0b	4.5bcd	3.9bc	2.3ab
N1K1	13.7d	6.3ab	4.5bcd	3.7bc	2.1b
N1K2	17.7b	6.4a	4.5bcd	3.8bc	2.2b
N1K3	13.3d	6.2abc	5.0ab	4.1ab	2.4ab
N2K1	15.3bcd	7.0a	4.5bcd	3.4c	2.0b
N2K2	17.0bc	5.3bc	4.7abc	3.8bc	2.3ab
N2K3	14.7bcd	6.2abc	5.0ab	4.1ab	2.1b
N3K1	14.0cd	6.4a	4.3cd	3.1c	2.6a
N3K2	20.3a	5.2c	5.3a	4.3a	2.2b
N3K3	14.0cd	6.9a	3.9d	3.5c	2.4ab
P _N	0.8544	0.9652	0.8278	0.8024	0.2317
P _K	0.0075	0.1215	0.5738	0.1286	0.9085
P _{N×K}	0.0164	0.3173	0.4450	0.1032	0.2105

农民习惯施肥处理和控释肥处理间 0—20 cm 土层土壤速效钾含量随生育期表现出先升高后降低的趋势,不同处理间差异显著,CK 在鳞芽分化期升高,控释肥处理在开花期升高。开花期到落叶期内,等施肥量下的控释肥处理(N2K2)较农民习惯施肥处理(CK)的速效钾含量提高 16.1%~122.6%。虽然控释肥处理总体上表现为氮钾单因素差异不显著,且无明显交互作用,但在 N1、N2 施氮水平下,随着施钾水平的提高,表层土壤速效钾含量呈现显著的增高趋势,在 N3 水平下,随着施钾水平的增高,表层土壤速效钾含量呈现先升后降的趋势。在控释肥处理的 K1、K2 水平下,施氮水平对表层土壤速效钾含量无显著影响,在 K3 水平下,幼蕾期和开花期的表层土壤速效钾含量随施氮水平的增加而降低;叶片生长期和鳞芽分化期的表层土壤速效钾含量随施氮水平的增加表现出先增加后降低的趋势,落叶期施氮水平处理对表层土壤速效钾含量无显著差异(表 4)。

2.3 控释尿素和控释氯化钾配施对牡丹株高和茎粗的影响

在叶片生长期和鳞芽分化期,合理施用控释氮钾较农民习惯处理显著提高株高 8.6%~23.0%和 7.6%~17.8%,除开花期和落叶期外,控释尿素和控释氯化钾配施均对株高具有显著的交互作用。在不同生育期,随叶片生长和脱落,不同控释尿素和控释氯化钾配施处理的牡丹株高呈现相同的先增高后降低的趋势,随着生长周期的进行,各处理均在叶片生长期达到最大值,且各处理间差异显著,其中 N3K3 处理最高,较等氮处理高

23.9%~36.4%，较等钾处理高 37.9%~45.0%，N2K2 处理的株高显著高于等氮处理 19.5%~21.8%，显著高于 N3K2 处理 9.4%（表 5）。

表 4 不同施肥处理的 0—20 cm 土层速效钾含量

处理	单位：mg/kg				
	幼蕾期	开花期	叶片	鳞芽	落叶期
			生长期	分化期	
N1	139.8a	272.5a	170.2a	134.1a	164.7a
N2	121.5a	197.4a	183.2a	169.6a	170.3a
N3	117.3a	172.0a	170.5a	163.2a	173.8a
K1	111.1a	208.1a	165.7a	148.0a	155.6a
K2	129.0a	210.1a	185.0a	160.5a	177.6a
K3	138.5a	223.7a	173.3a	158.4a	175.6a
CK	165.4a	98.3e	150.2c	155.6b	143.7d
N1K1	115.0bcd	322.3a	158.1bc	118.0d	154.0cd
N1K2	127.0bcd	190.0bcd	178.4abc	131.4cd	150.9cd
N1K3	177.3a	305.3a	174.2abc	152.8bc	189.2ab
N2K1	111.3cd	159.6bcd	152.3c	147.6c	154.0cd
N2K2	118.3bcd	218.8b	203.8a	180.6a	181.0ab
N2K3	135.0bc	213.8bc	193.4ab	180.7a	175.9bc
N3K1	107.0cd	142.5d	186.6ab	178.4a	158.7cd
N3K2	141.7b	221.4b	172.7abc	169.4ab	200.9a
N3K3	103.3d	152.0cd	152.2c	141.7c	161.8c
P_N	0.5089	0.1230	0.6718	0.1183	0.8585
P_K	0.3811	0.9608	0.4840	0.8218	0.2748
$P_{N \times K}$	0.1939	0.1181	0.3251	0.0972	0.2359

表 5 不同施肥处理各生育期的牡丹株高

处理	单位：cm				
	幼蕾期	开花期	叶片	鳞芽	落叶期
			生长期	分化期	
N1	17.2a	42.4a	39.5c	39.9a	27.9a
N2	16.5a	42.1a	43.4b	39.0a	25.1b
N3	16.6a	40.3a	47.0a	40.0a	25.5b
K1	17.6a	42.2a	40.2c	40.1a	27.2a
K2	15.4b	41.5a	47.0a	39.1a	24.9a
K3	17.3a	41.0a	42.7b	39.7a	26.5a
CK	17.8bc	39.8a	45.1de	37.5e	29.8a
N1K1	18.8a	41.5a	39.0f	44.2a	30.3ab
N1K2	15.2cd	42.6a	47.2bc	40.3cd	25.0c
N1K3	17.7ab	43.0a	36.3g	35.1f	28.4abc
N2K1	18.8a	43.0a	41.0def	37.7e	25.7c
N2K2	14.6d	42.8a	49.0bc	38.2de	24.8c
N2K3	16.1bcd	40.4a	40.2ef	41.2bc	24.8c
N3K1	15.2cd	39.9a	40.7ef	38.5de	25.5c
N3K2	16.6bcd	37.7a	44.8cd	38.7de	24.9c
N3K3	18.1ab	43.2a	55.5a	42.9ab	26.2bc
P_N	0.2193	0.6671	<0.0001	0.3177	0.0509
P_K	0.0004	0.8940	<0.0001	0.3630	0.1460
$P_{N \times K}$	0.0005	0.7449	<0.0001	<0.0001	0.3974

在幼蕾期和鳞芽分化期，控释氮钾配施处理较农民习惯施肥处理显著提高茎粗 16.4%~20.2% 和 18.4%~26.2%。各控释肥处理在幼蕾期、开花期及叶片生长期的茎粗差异不显著，在鳞芽分化期 N1K1 和 N2K2 相较于 N3K1 和 N3K2 分别显著提高 23.3% 和 17.2%。在落叶期，N1K2 相较于 N2K2 和 N3K2 分别提

高 26.3% 和 16.5%，其余处理间差异不显著。控释尿素和控释氯化钾的交互作用不显著（表 6）。

表 6 不同施肥处理各生育期的牡丹茎粗

处理	单位：mm				
	幼蕾期	开花期	叶片	鳞芽	落叶期
			生长期	分化期	
N1	10.1a	10.4a	12.5a	12.9a	12.8a
N2	10.5a	11.1a	12.1a	13.0a	12.1a
N3	10.7a	10.6a	11.8a	11.6b	12.0a
K1	11.1a	10.6a	11.8a	12.5ab	12.9a
K2	9.4b	10.7a	12.1a	12.9a	12.8a
K3	10.7a	10.8a	12.4a	12.3ab	12.0a
CK	9.5cd	11.3a	11.8a	11.9ab	12.3abc
N1K1	11.0ab	10.6a	12.3a	12.8ab	13.0ab
N1K2	8.8d	10.5a	12.7a	13.6a	13.6a
N1K3	10.4abc	10.1a	12.5a	12.5ab	11.6bc
N2K1	11.0ab	11.2a	11.9a	13.6a	13.4ab
N2K2	10.0bc	11.7a	11.9a	13.5a	10.8c
N2K3	10.3abc	10.3a	12.6a	12.0ab	11.7bc
N3K1	11.3a	9.9a	11.2a	11.0b	12.2abc
N3K2	9.4cd	10.0a	11.8a	11.5ab	11.7bc
N3K3	11.3a	11.9a	12.3a	12.3ab	12.5ab
P_N	0.1300	0.6819	0.2160	0.0088	0.2586
P_K	<0.0001	0.9542	0.3018	0.3494	0.1718
$P_{N \times K}$	0.1458	0.4192	0.8156	0.0932	0.0587

2.4 控释尿素和控释氯化钾配施对牡丹鲜花性质的影响

施氮量对单花重、花瓣可溶性糖含量和花色苷含量具有显著影响，随着控释尿素施用水平增加，牡丹单花重呈显著增加趋势，N3 水平较 N1、N2 水平显著提高单花重 15.2% 和 7.2%；控释尿素的施用量对牡丹单株花数、良品率和经济收益均有显著影响，N2 水平较 N1 和 N3 水显著提高了牡丹单株花数显著提高 16.5% 和 18.5%，在 N1 施肥量下，随着施钾量的增加，单株花数呈增加趋势，N1K3 处理较 N1K2 处理显著增加 22.7%；在 K1 施用量下，随着氮肥施用量的增加，表现出先增加后降低的趋势，N2K1 处理的单株花数较高，较 N1K1、N3K1 处理的单株花数显著提高 30.4% 和 36.4%；N2K1 和 N2K2 处理单株花数较高，较 N1K1 和 N3K3 处理分别提高单株花数 26.1%~30.4%，N2K1 和 N2K2 处理较 CK 分别显著提高 30.4% 和 26.1%；N2、N3 水平的可溶性糖含量较 N1 显著降低 12.7% 和 11.0%；花色苷含量呈先增加后降低的规律，N2 水平的牡丹花瓣花色苷含量较 N1、N3 水平显著提高 14.0% 和 25.6%。而施钾量因素和氮钾交互水平对单花重的影响不显著，但在 K3 施用量下，随着施氮量的增加，平均单花重呈增加的趋势，N3K3 处理较 N1K3 处理的平均单花重显著提高 27.7%。CK 对比等施肥量的控释肥处理，单花重、花瓣可溶性糖含量和花色苷含量均无显著差异（表 7）。

表 7 不同处理牡丹花朵单花重、单株花数、可溶性糖和花色素苷含量

处理	单花重/ g	单株花数/ 朵	可溶性糖/ %	花色素苷/ (ΔA · g ⁻¹ FW)
N1	9.81c	2.42b	0.12a	0.49b
N2	10.54b	2.82a	0.10b	0.55a
N3	11.30a	2.38b	0.11b	0.44b
K1	10.75a	2.51a	0.10a	0.43b
K2	10.70a	2.58a	0.11a	0.54a
K3	10.19a	2.53a	0.12a	0.48ab
CK	10.14bcd	2.28bc	0.11ab	0.61a
N1K1	9.48cd	2.31bc	0.11ab	0.44bc
N1K2	10.83ab	2.24c	0.12a	0.53ab
N1K3	9.13d	2.69ab	0.12a	0.47bc
N2K1	10.62abc	3.03a	0.10b	0.51abc
N2K2	10.24bcd	2.87a	0.11ab	0.60a
N2K3	10.76ab	2.68abc	0.10b	0.55ab
N3K1	11.18ab	2.15c	0.10b	0.43c
N3K2	11.07ab	2.66abc	0.11ab	0.47bc
N3K3	11.65a	2.34bc	0.10b	0.43c
P _N	0.0006	0.0151	0.0131	0.0086
P _K	0.1241	0.8909	0.2308	0.0637
P _{N×K}	0.5656	0.0616	0.6584	0.9423

2.5 控释尿素和控释氯化钾配施对牡丹叶片生长期光合特性的影响

氮素施用水平对牡丹叶片光合特性具有显著的

影响,在相同施钾量下,随着施氮量的增加,净光合速率显著增加,N3 水平处理较 N1 和 N2 处理分别显著提高 101.9%和 46.8%;不同水平的氮钾配施具有显著的交互作用,N3K2 处理的净光合速率最高,但钾素施用水平对净光合速率影响不显著;在等钾施用量下,随着氮素施用水平增加,叶片气孔导度和蒸腾速率呈现先增加后降低的趋势,胞间二氧化碳浓度呈现显著的降低趋势,N2 处理较 N1 和 N3 处理显著提高气孔导度 56.2%和 70.1%,提高蒸腾速率 45.1%和 56.9%,N2 和 N3 处理较 N1 处理分别降低胞间二氧化碳浓度 13.1%和 26.9%;等氮施用量下,随着施钾水平的提高,叶片气孔导度、蒸腾速率和胞间二氧化碳浓度呈现出显著的降低趋势,K3 处理较 K1、K2 处理分别显著降低气孔导度 6.2%和 33.0%,降低蒸腾速率 32.6%和 22.0%,降低胞间二氧化碳浓度 22.1%和 18.2%,且氮钾交互对叶片气孔导度、胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率具有显著影响。不同控释尿素处理对牡丹叶片生长期光合特性的影响显著,且 N3K2 处理的净光合作用显著高于 CK 28.0%,CK 较控释肥处理的气孔导度、胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率分别显著降低 51.2~61.8%,43.3%~64.4%和 21.6%~51.1%,在相同施肥量下,CK 与 N2K2 处理无显著差异(表 8)。

表 8 不同施肥处理的牡丹叶片生长期光合特性

处理	净光合速率/ (μmol · m ⁻² · s ⁻¹)	气孔导度/ (mol ² · mol ⁻¹)	胞间二氧化碳浓度/ (μmol · mol ⁻¹)	蒸腾速率/ (μmol · m ⁻² · s ⁻¹)
N1	5.78c	0.07b	209.93a	2.69b
N2	7.94b	0.11a	182.33b	3.91a
N3	11.66a	0.07b	153.39c	2.49b
K1	8.66a	0.10a	199.63a	3.58a
K2	8.65a	0.09a	190.37a	3.10b
K3	8.07a	0.07b	155.66b	2.42c
Control	10.32bc	0.06d	93.47d	2.39cd
N1K1	6.14e	0.08cd	244.75a	3.05b
N1K2	7.10de	0.06d	199.23b	2.27cd
N1K3	4.09f	0.08cd	185.80bc	2.77bc
N2K1	9.59c	0.12b	189.17b	4.52a
N2K2	9.65c	0.16a	262.75a	4.88a
N2K3	8.58cd	0.06d	95.08d	2.32cd
N3K1	10.25bc	0.09c	164.96c	3.16b
N3K2	13.21a	0.06d	109.12d	2.14d
N3K3	11.54ab	0.06d	186.08bc	2.17d
P _N	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
P _K	0.3992	0.0028	<0.0001	<0.0001
P _{N×K}	0.0004	0.0005	<0.0001	<0.0001

3 讨论

牡丹是多年生木本植物,因此需要大量且持续的养分供应支撑多年生长,传统施肥方式采用多次追肥为牡丹的越冬提供保护,为新枝生长、花芽分化和植

株复壮提供养分^[2,14]。控释肥的实际田间释放期会显著长于静水释放期,且控释肥的养分释放为扩散机制,受温度影响大^[19],郑文魁等^[15]在冬小麦的田间试验中发现,静水释放期为 3 个月的控释尿素可满足

小麦全年生长所需养分。本研究采用的控释肥静水释放期为 84 天,且同属温带季风气候的临近地区,积温低温基本一致^[20-21],据此合理推测本研究采用的控释肥具有持续充足供应牡丹全年生长所需养分的能力,土壤中有效态氮含量显著高于习惯施肥处理。由于习惯施肥中追肥的施肥方式,导致幼蕾期和鳞芽分化期的土壤速效养分含量升高,对单株花数和单花重的影响中,部分控释肥处理与习惯施肥处理无显著差异,但单株花数最高的处理仍为控释肥处理。习惯施肥方式后期需追肥提供养分,增加了人工成本,但是土壤养分的速效养分含量与等量控释肥处理(N2K2)差异不显著,因此等量的控释肥处理可完全代替习惯施肥处理。

叶片生长期是牡丹的一个重要时期,此时叶片光合作用最强,以积累干物质为牡丹后续的鳞芽分化和种子成熟提供储备^[2],氮素是叶绿素的组分元素,合理施用氮肥能促进叶绿素的合成,提高光合效率,促进叶片光合作用^[22],不同的施氮水平对牡丹的光合作用具有极显著的影响(表 9)。在 N1 施肥量下,控释肥处理的叶片净光合作用均显著低于传统施肥处理,但是随氮肥施肥量的增加,叶片光合能力显著提高,这与段祥光等^[23]的增施氮肥能提高牡丹叶片光合能力的研究结果相符。习惯施肥处理和等施肥量的控释肥处理无显著差异,在叶片生长期的光合作用 N3K2 处理显著高于习惯施肥处理,因此控释肥能满足光合需求,有利于牡丹持续和后续生长。钾元素具有促进叶绿素合成、改善叶绿体结构、促进叶片对 CO₂ 的同化和促进光合产物运输等重要作用^[22],但在满足作物所需的情况下,施钾量不宜过高。本研究数据表明,在施氮量固定时,K3 施钾量较同施氮量的处理气孔导度、胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率均有不同程度的降低,这与张晓伟等^[24]在梨树叶片上的研究结论相符。

牡丹作为观赏型花卉,其价值与其生长状况密切相关,包括花期的花朵鲜切花观赏价值和落叶期的整株苗木价值,提高单株花数和株高可以提高苗木评级,对苗木价值有直接的影响。综合本研究的结果来看,当施氮量为 270 kg/hm²、施钾量为 90 kg/hm² 时,株高、单株花数、单花重和花色苷含量等指标均处于最高水平,且继续增加施肥量不会显著提高指标水平,因此选择 N2K1 和 N2K2 为优选处理。氮素的充足供应可以显著促进牡丹早春复壮、新枝生长和促进光合^[25],同时氮肥钾肥均可提高花芽分化能力,但是氮肥的过量施用会抑制开花^[23];Song 等^[26]研究表明,增加钾元素能显著延长康乃馨切花花期;祖艳群等^[27]研究指出,保持均衡的氮钾供应,对作物的生长、发育和代谢过程具有显著的促进作用;邵蕾等^[28]

研究发现,控释氮钾肥较普通氮钾肥能显著提高海棠花对氮钾元素的吸收,并提高花卉株高、茎粗和干物质量等。因此,控释肥在观赏型花卉的栽培中具有广阔的应用前景,在未来需要进一步探讨控释掺混氮钾肥交互对牡丹药用和产油率等经济价值的影响,为缓控释肥在花卉领域的规模化推广应用提供理论依据。

4 结论

(1)控释尿素和控释氯化钾的配施一次性施肥较基肥加追肥的习惯施肥方式不会降低土壤有效养分含量,可以持续稳定满足牡丹越冬、开花和后续生长的养分需求,并且降低人工作业成本。

(2)氮钾交互配施对牡丹的生长及光合特性具有显著促进作用,合理的氮钾配比显著提高了牡丹单株花数、单花重、株高和光合能力,在本研究条件下,N2K1 为优选处理。

参考文献:

- [1] 李庆逵,朱兆良,于天仁.中国农业持续发展中的肥料问题[M].江西:江西科学技术出版社,1998:1-5.
- [2] 蒋立昶,赵孝知.菏泽牡丹栽培技术[M].天津:天津科学技术出版社,1996:32-35.
- [3] 张利霞,李明月,魏东峰,等.平衡施肥对油用牡丹生长与种子产量的影响[J].甘肃农业大学学报,2018,53(5):58-68.
- [4] 黄伟,张俊花,李文杰,等.钾营养对地膜覆盖小南瓜产量和贮藏特性的影响[J].西北农业学报,2009,18(5):262-265.
- [5] 张丽萍,汪宗喜,程家高,等.安徽铜陵药用牡丹不同生长期物质的积累和氮、磷、钾的吸收动态[J].现代中药研究与实践,2005,19(5):8-11.
- [6] 魏冬峰,马慧丽,张利霞,等.牡丹植株矿质营养年周期变化规律的研究[J].北方园艺,2015(12):66-70.
- [7] Sui C L, Liu Y M, Zhang M. Fate of polymer-coated N-15-urea in the corn-wheat rotation system[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2018, 20(2): 387-396.
- [8] Geng J B, Chen J Q, Sun Y B, et al. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency and yield of wheat and corn [J]. Agronomy Journal, 2016, 108(4): 1666-1673.
- [9] Zheng W K, Liu Z G, Zhang M, et al. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system[J]. Field Crops Research, 2017, 205: 106-115.
- [10] Zhang S G, Shen T L, Yang Y C, et al. Controlled-release urea reduced nitrogen leaching and improved nitrogen use efficiency and yield of direct-seeded rice[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 220: 191-197.
- [11] Tian X F, Geng J B, Guo Y L, et al. Controlled-release u-

rea decreased ammonia volatilization and increased nitrogen use efficiency of cotton[J].*Journal of Plant Nutrition and Soil Science*,2017,180(6):667-675.

[12] Tian X F, Li C L, Zhang M, et al. Controlled release urea improved crop yields and mitigated nitrate leaching under cotton-garlic intercropping system in a 4-year field trial[J].*Soil and Tillage Research*,2018,175:158-167.

[13] Tian X F, Li C L, Zhang M, et al. Effects of controlled-release potassium fertilizer on available potassium, photosynthetic performance, and yield of cotton[J].*Journal of Plant Nutrition and Soil Science*,2017,180(5):505-515.

[14] 王莲英.中国牡丹品种图志[M].北京:中国林业出版社,1998:187-189.

[15] 郑文魁,李成亮,窦兴霞,等.不同包膜类型控释氮肥对小麦产量及土壤生化性质的影响[J].*水土保持学报*,2016,30(2):162-174.

[16] 姜天华,温立柱,郭芸琿.生物炭与氮肥配施对牡丹叶片氮素营养和籽粒品质的影响[J].*应用生态学报*,2017,28(9):2939-2946.

[17] 林植芳,李双顺,张东林,等.采后荔枝果皮色素、总酚及有关酶活性的变化[J].*植物学报*,1988,30(1):40-45.

[18] 张昭其,庞学群,段学武,等.荔枝采后果皮花色苷的降解与花色苷酶活性变化[J].*中国农业科学*,2003,36(8):945-949.

[19] 颜晓.缓控释肥养分释放率快速测定及在田间土壤中释放率的相关性研究[D].山东 泰安:山东农业大学,2010.

[20] 臧海佳,李星玉,李俊,等.山东地区木本植物春季物候对气候变化的响应[J].*中国农业气象*,2011,32(2):17-23.

[21] 周宝元,马玮,孙雪芳,等.冬小麦—夏玉米高产模式周年气候资源分配与利用特征研究[J].*作物学报*,2019,45(4):109-120.

[22] 陆景陵.植物营养学[M].北京:中国农业大学出版社,2011:34-35.

[23] 段祥光,张利霞,刘伟,等.施氮量对油用牡丹‘凤丹’光合特性及产量的影响[J].*南京林业大学学报(自然科学版)*,2018,42(1):48-54.

[24] 张晓伟,白牡丹,高鹏,等.氮磷钾肥配施对玉露香梨叶绿素含量及光合特性的影响[J].*农学学报*,2018,8(12):79-83.

[25] 高志民,王莲英.牡丹催花后复壮栽培根系生长及光合特性研究[J].*林业科学研究*,2004,17(4):479-483.

[26] Song L, Liu H, You Y, et al. Quality deterioration of cut carnation flowers involves in antioxidant systems and energy status[J].*Scientia Horticulturae*,2014,170:45-52.

[27] 祖艳群,林克惠.氮钾营养的交互作用及其对作物产量和品质的影响[J].*土壤肥料*,2000(2):3-7.

[28] 邵蕾,王丽霞,张民,等.控释氮钾肥对海棠氮、磷、钾利用率的影响[J].*应用生态学报*,2010,21(9):2309-2316.

[29] 颜晓.缓控释肥养分释放率快速测定及在田间土壤中释放率的相关性研究[D].山东 泰安:山东农业大学,2010.

[30] 黄绍文,金继运,杨俐苹,等.粮田土壤磷、钾养分的垂直分布特征[J].*土壤肥料*,2001(4):8-12.

[31] Yao Y F, Shao M G, Fu X L, et al. Effects of shrubs on soil nutrients and enzymatic activities over a 0—100 cm soil profile in the desert-loess transition zone[J].*Catena*,2019,174:362-370.

[32] 刘方明,孟凡祥,梁文举,等.科尔沁退化草地改良的工程措施及效果[J].*辽宁工程技术大学学报*,2005,24(增刊 2):257-259.

[33] 汪文强,王子芳,高明,等.施氮对紫色土交换性酸及盐基饱和度的影响[J].*水土保持学报*,2014,28(3):138-142.

[34] 姜勇,张玉革,梁文举.温室蔬菜栽培对土壤交换性盐基离子组成的影响[J].*水土保持学报*,2005,19(6):78-81.

(上接第 311 页)

[22] 李静鹏,徐明锋,苏志尧,等.不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价[J].*生态学报*,2014,34(9):2297-2307.

[23] 魏孝荣,邵明安.黄土高原小流域土壤 pH、阳离子交换量和有机质分布特征[J].*应用生态学报*,2009,20(11):2710-2715.

[24] 文小琴,舒英格,何欢.喀斯特山区土地不同利用方式的土壤养分及微生物特征[J].*西南农业学报*,2018,31(6):1227-1233.

[25] Esteban G J, Robert B J. The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants[J].*Biogeochemistry*,2001,53(1):51-77.

[26] Ernst L, Subhadip G, Marcus D, et al. Distribution of nutrients and trace elements in forest soils of Singapore[J].*Chemosphere*,2019,222:62-70.

[27] 秦川,何丙辉,刘永鑫,等.生物埂护坡上黄花根系分布