

蚯蚓粪肥部分替代化肥对兰州百合 光合特性、品质和产量的影响

张卓 聂江力 邱晓坤 宿珈嘉 任俊涵 刘广慧 刘艳军 裴毅

(天津农学院园艺园林学院, 300392, 天津)

摘要 以兰州百合为试验材料, 采用田间试验法, 施用 100%化肥处理作为对照 (CK), 研究 90%化肥配施 9600 kg/hm² 蚯蚓粪肥 (T1)、80%化肥配施 10 800 kg/hm² 蚯蚓粪肥 (T2)、70%化肥配施 12 000 kg/hm² 蚯蚓粪肥 (T3)、60%化肥配施 13 200 kg/hm² 蚯蚓粪肥 (T4) 对兰州百合生长、光合特性、鳞茎品质和产量等多方面的影响。结果表明, 蚯蚓粪肥部分替代化肥可在一定程度上促进兰州百合地上部与地下鳞茎的生长, T2 处理显著提高了植株各生育期的株高、茎粗和叶片数, T3 处理最有利于鳞茎的生长, 相较于 CK 处理鳞茎直径和鲜重分别增加了 4.65% 和 20.27%。蚯蚓粪肥部分替代化肥不同程度地提高了叶片的光合特性, 植株叶片的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度在 T2 处理下达到峰值, 相较于 CK 处理分别提高了 34.52%、37.20% 和 56.78%; 胞间 CO₂ 浓度在 T3 处理下达到峰值, 相较于 CK 处理提高了 30.43%, 但与 T2 处理间无显著差异。蚯蚓粪肥部分替代化肥处理的鳞茎营养品质均优于 CK 处理, 可溶性糖含量在 T2 处理下最高, 相较于 CK 处理提高了 29.82%; 可溶性蛋白质、总酚和维生素 C 含量在 T3 处理下最高, 相较于 CK 处理分别提高了 45.80%、47.21% 和 53.59%; 但总黄酮含量在各处理间无显著差异。综合来看, 70%化肥配施 12 000 kg/hm² 蚯蚓粪肥处理可显著提高鳞茎的品质和产量, 经济效益最好。

关键词 兰州百合; 化肥; 蚯蚓粪; 光合特性; 鳞茎品质; 产量

兰州百合 (*Lilium davidii* var. *willmottiae*) 是百合科 (Liliaceae) 百合属 (*Lilium*) 多年生草本植物, 富含蛋白质、多糖和维生素等营养成分, 具有润肺止咳、抗肿瘤、美容养颜和提高免疫力等作用, 是我国第一食药两用百合品种^[1]。近年来, 兰州百合深受消费者喜爱, 需求量不断扩大。但兰州百合种植长期使用化肥, 使得土壤有机质含量持续下降, 土壤结构和理化性质不断恶化, 导致鳞茎产量和品质下降^[2]。

增施有机肥替代部分化肥是减少化肥投入、改善作物产量和品质的有效方法之一。合理施用有机肥可以改善土壤理化性质, 促进土壤有机质积累与更新, 从而提高作物的产量和品质^[3]。侯丽丽等^[4]研究表明, 有机肥替代部分化肥有助于提高小麦的产量和叶片的光合能力。鲁伟丹等^[5]研究证明, 有机肥替代不同比例的化肥相比于常规施化肥可以显著提高甜菜的养分吸收量, 培肥土壤, 增加产量。袁辉等^[6]研究表明, 有机肥替代化肥增加了马铃薯叶片的光合效率和干物质的有效转运, 提高了产

量。但以往研究大多数集中于鸡、羊和猪等家畜类的粪便作为有机肥部分替代化肥对作物产量的影响, 关于减少施用化肥并配施蚯蚓粪肥对作物品质和产量影响的研究较少, 且在百合科植物中鲜见报道。通过蚯蚓对畜禽粪便处理得到的蚯蚓粪, 富含有机质和腐殖酸等养分, 与化肥配施后可以显著提高土壤透气和保水能力。此外, 与一般家禽类粪便相比, 蚯蚓粪还富含多种激素和酶类物质, 其应用价值逐渐受到研究者的青睐^[7]。吴东阳等^[8]研究表明, 以猪粪为原料得到的蚯蚓粪可以改善土壤质量、促进辣椒生长和提高营养品质, 且以蚯蚓粪替代 30%化肥处理的综合效果最佳。颜振峰等^[9]研究表明, 化肥减量 30% 并配施 3000 kg/hm² 以牛粪为原料的蚯蚓粪可提高番茄的产量和品质。黄剑^[10]研究表明, 相较于常规处理, 将蚯蚓粪与草炭、秸秆混合发酵制备有机肥以 50% 替代化肥的施肥处理, 在提高网纹瓜果实产量和品质方面表现突出。本试验以兰州百合为材料, 探索化肥减量增施蚯蚓粪对其生长、叶片光合特性和鳞茎品质等方面的影

作者简介: 张卓, 研究方向为蔬菜育种与栽培, E-mail: zhuozhang1999@163.com

裴毅为通信作者, 研究方向为药用植物与经济植物资源开发利用, E-mail: peiyee@126.com

基金项目: 天津市农业产学研用“揭榜挂帅”项目 (GBGG202312); 甘肃省科技计划项目 (22CX8NE193); 天津市科技计划项目 (24YDTPJC00880)

收稿日期: 2025-05-08; 修回日期: 2025-07-09; 网络出版日期: 2025-07-29

响及应用效果，以期为兰州百合的可持续优质生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料购买于甘肃省兰州市七里河区，经天津农学院园艺园林学院裴毅教授鉴定为兰州百合一年生鳞茎。有机肥以牛粪为原料，经蚯蚓处理得到蚯蚓粪，由天津市静海区某农户养殖场提供（N+P₂O₅+K₂O≥5%，有机质≥60%）。化肥为尿素（N 46%）、过磷酸钙（P₂O₅ 16%）和硫酸钾（K₂O 52%）。

1.2 试验地概况与试验设计

试验地点位于天津农学院东校区药用植物园，年均气温 16.6℃，年均降水量 584.6 mm，园内土壤类型为黏壤土。试验地土壤（0~30 cm）基本理化性质为铵态氮 16.75 mg/kg、硝态氮 19.25 mg/kg、有效磷 12.46 mg/kg、速效钾 266.00 mg/kg、有机质 9.46 g/kg。

试验共设置 5 个处理（表 1），每个处理重复 3 次。随机区组设计，小区面积为 15 m²。种植株距为 0.2 m，行距为 0.4 m，常规田间管理。试验于 2024 年 3 月开始，3 月初整地施肥，将化肥与蚯蚓粪肥作为基肥一次性均匀撒入土壤。3 月 10 日定植，10 月 2 日百合进入茎叶枯萎期后开始采收鳞茎。

表 1 不同施肥处理化肥和蚯蚓粪施用量
Table 1 Application amount of chemical fertilizer and earthworm manure in different fertilization treatments

处理 Treatment	蚯蚓粪肥施用量 Application amount of earthworm manure (kg/hm ²)	化肥比例 Fertilizer ratio (%)	化肥施用量 Fertilizer application rate (kg/hm ²)		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	0	100	240	90	150
T1	9600	90	216	81	135
T2	10 800	80	192	72	120
T3	12 000	70	168	63	105
T4	13 200	60	144	54	90

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生长指标 分别于幼苗期（植株地上部分有初生叶，地下部分出现侧根）、现蕾期（植株一级侧枝出现绿色花蕾）、开花期（花蕾开放，花被中暴露雌雄蕊）和谢花期（花朵开始凋谢）每个小区随机选择 5 株植株，测定株高、基部的茎粗和叶片

数。将茎叶枯萎期（地上部枯萎）收获的鳞茎清洗干净表面泥土后测定鳞茎直径和鲜重，并计算产量。经济效益指标计算公式：鳞茎产值=产量×单价，产出投入比=产值/（肥料成本+其他成本），纯收益=鳞茎产值-肥料成本-其他成本。

1.3.2 叶片光合参数 6~9 月，每月中旬选取晴朗天气，于上午 9:00~11:00 使用便携式光合测量仪（德国 Walz GFS-3000）测定植株叶片的净光合速率（P_n）、气孔导度（G_s）、蒸腾速率（T_r）和胞间 CO₂ 浓度（C_i）。测量时各处理选择 5 株向阳侧相同位置的健康叶片。

1.3.3 鳞茎品质指标 选取鳞茎最外层健康无病虫害的新鲜鳞片，测定其可溶性糖、可溶性蛋白质和维生素 C（V_c）含量；将 50℃烘干的最外层鳞片粉碎过筛，测定样品总黄酮和总酚含量。其中采用蒽酮比色法^[11]测定可溶性糖含量；采用考马斯亮蓝法^[12]测定可溶性蛋白质含量；采用 NaNO₂-AlCl₃法^[13]测定总黄酮含量；采用 Folin-Ciocalteus 法^[14]测定总酚含量；采用 2,6-二氯酚靛酚法^[15]测定 V_c 含量。

1.4 数据处理

采用 Excel 软件对数据进行整理，采用 SPSS 22.0 软件进行试验结果差异显著性分析，采用 Origin 2021 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对兰州百合地上部分生长指标的影响

由表 2 可知，各蚯蚓粪肥部分替代化肥处理的百合株高均显著高于 CK 处理，且随蚯蚓粪肥替代化肥施用量的增加呈先升后降的趋势。各生育期阶

表 2 不同施肥处理对兰州百合株高的影响
Table 2 Effects of different fertilization treatments on plant height of *Lilium davidii* var. *willmottiae*

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)			
	幼苗期 Seedling period	现蕾期 Bud period	开花期 Flowering period	谢花期 End flowering period
CK	14.24±0.95b	20.46±0.84b	22.28±1.15b	23.10±1.03b
T1	17.84±0.83a	24.58±1.16a	26.32±0.88a	27.08±1.29a
T2	19.08±0.64a	27.38±0.99a	29.20±1.20a	30.08±1.24a
T3	17.20±0.72a	24.54±1.07a	26.64±1.21a	27.26±0.77a
T4	17.08±1.24a	24.14±1.18a	26.12±0.40a	26.68±0.92a

不同小写字母表示差异达显著水平（P<0.05），下同。
Different lowercase letters indicate significant differences at P<0.05 level, the same below.

段, T2 处理的株高均最大, 但与 T1、T3 和 T4 处理间无显著差异。相比于 CK 处理, 蚯蚓粪肥部分替代化肥处理在幼苗期、现蕾期、开花期和谢花期的株高分别增加 19.94%~33.99%、17.99%~33.82%、17.24%~31.06%、15.50%~30.22%, 可以看出各蚯蚓粪肥部分替代化肥处理在幼苗期的株高增幅最大, 此后随生育期的进行逐渐降低。

由表 3 可知, 植株茎粗均表现为随蚯蚓粪肥替代化肥施用量的增加呈先增加后减少。各生育期蚯蚓粪肥部分替代化肥处理的植株茎粗均优于 CK 处理, 各处理茎粗表现为 T2>T3>T1>T4>CK, 其中 T2 处理均最高, 显著高于 CK 处理。相比于 CK 处理, 蚯蚓粪肥部分替代化肥处理在幼苗期、现蕾期、开花期和谢花期的茎粗分别增加 1.02%~3.67%、1.07%~4.46%、1.24%~3.25%、1.03%~2.20%。在谢花期各处理植株茎粗达到最大值, T1、T3、T4 处理与 CK 处理间无显著差异。

表 3 不同施肥处理对兰州百合茎粗的影响
Table 3 Effects of different fertilization treatments on the stem diameter of *Lilium davidii* var. *willmottiae*

处理 Treatment	茎粗 Stem diameter (cm)			
	幼苗期 Seedling period	现蕾期 Bud period	开花期 Flowering period	谢花期 End flowering period
CK	0.491±0.002b	0.561±0.002d	0.647±0.003c	0.681±0.002b
T1	0.499±0.005ab	0.576±0.003bc	0.661±0.004ab	0.691±0.002ab
T2	0.509±0.003a	0.586±0.003a	0.668±0.004a	0.696±0.003a
T3	0.502±0.004ab	0.581±0.003ab	0.662±0.003ab	0.693±0.007ab
T4	0.496±0.005ab	0.567±0.003cd	0.655±0.002bc	0.688±0.002ab

不同施肥处理植株的叶片数随生育期的变化趋势与株高一致(表 4)。蚯蚓粪肥部分替代化肥处理的植株叶片数在各生育期均高于 CK 处理, 且 T2 处理的叶片数均最高。在幼苗期阶段, T1、T2、T3 和 T4 处理相比于 CK 处理分别增加 10.94%、

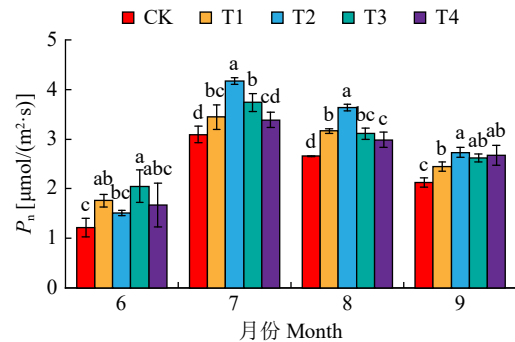
表 4 不同施肥处理对兰州百合叶片数的影响
Table 4 Effects of different fertilization treatments on leaf number of *Lilium davidii* var. *willmottiae*

处理 Treatment	叶片数 Number of leaves			
	幼苗期 Seedling period	现蕾期 Bud period	开花期 Flowering period	谢花期 End flowering period
CK	106.00±4.17c	146.80±2.69c	153.60±2.09c	156.80±6.95c
T1	117.60±1.91ab	163.40±3.33b	171.40±4.33b	175.60±1.94b
T2	125.20±4.03a	181.60±3.61a	191.20±2.31a	196.40±3.12a
T3	114.80±3.35bc	163.00±3.39b	172.60±3.36b	176.60±4.09b
T4	112.40±2.77bc	158.60±2.77b	168.20±3.71b	172.00±3.27b

18.11%、8.30%和 6.04%, T3 和 T4 处理与 CK 处理间无显著差异。在现蕾期、开花期和谢花期, 蚯蚓粪肥部分替代化肥处理的叶片数均显著高于 CK 处理, 分别增加 8.04%~23.71%、9.51%~24.48%、9.69%~25.26%。在谢花期各施肥处理的植株叶片数达到最大值, T1、T3 和 T4 处理间无显著差异。

2.2 不同施肥处理对兰州百合光合指标的影响

P_n 直接反映了植株的光合作用能力。从图 1 可以看出, 不同施肥处理下兰州百合叶片的 P_n 整体变化规律一致, 均呈现先升高后降低的趋势。7 月兰州百合植株各个器官的生长发育均趋于成熟, 各施肥处理的植株叶片 P_n 均达到最高值, T1、T2、T3 和 T4 处理的植株叶片 P_n 分别为 3.44、4.17、3.74 和 3.39 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 相较于 CK 处理分别提高 10.97%、34.52%、20.65%和 9.35%, 且 T2 处理的 P_n 显著高于其他施肥处理。8-9 月随着气温降低、光照强度变弱、光照时长缩短, 植株的生长势减弱, 各施肥处理的 P_n 不断下降。最终叶片 P_n 的顺序为 T2>T4>T3>T1>CK 处理, T2 处理与 T3 和 T4 处理间无显著差异。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 1 不同施肥处理对兰州百合 P_n 的影响

Fig.1 Effects of different fertilization treatments on the P_n of *Lilium davidii* var. *willmottiae*

T_r 是反映植物水分利用效率和抗逆能力的主要参数。从图 2 可以看出, 各施肥处理下的植株叶片 T_r 变化趋势与 P_n 一致。随着 7 月气温的明显升高, 各施肥处理的植株叶片 T_r 均达到最高值, T1、T2、T3 和 T4 处理的植株叶片 T_r 分别为 3.69、4.50、4.22 和 3.96 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 相较于 CK 处理分别提高 12.50%、37.20%、28.66%和 20.73%, T2 处理显著高于其他施肥处理。8-9 月随着温度开始下降, 光照强度减弱和空气相对湿度增加, 各施肥处理的

T_r 不断下降, 最终叶片 T_r 的顺序为 $T3>T2>T4>T1>CK$ 处理, $T3$ 与 $T2$ 处理间无显著差异。

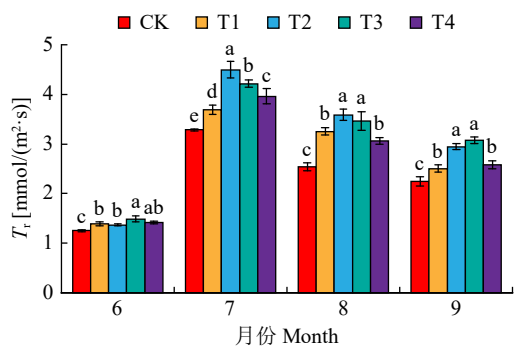


图 2 不同施肥处理对兰州百合 T_r 的影响
Fig.2 Effects of different fertilization treatments on T_r of *Lilium davidii* var. *willmottiae*

G_s 表示植物叶片气孔开张的程度, 是反映植物叶片与外界进行气体交换能力的量化指标。从图 3 可以看出, 各施肥处理在 7 月均达到最大值, $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 和 $T4$ 处理的植株叶片的 G_s 分别为 31.57、38.27、35.88 和 33.92 $mmol/(m^2 \cdot s)$, 相较于 CK 处理分别提高 29.33%、56.78%、46.99% 和 38.96%, $T2$ 处理的值最大, 但与 $T3$ 和 $T4$ 处理无显著差异。8-9 月, 各施肥处理的植株叶片的 G_s 均逐渐降低, 最终叶片 G_s 的顺序为 $T2>T3>T1>T4>CK$ 处理, $T2$ 处理与 $T1$ 、 $T3$ 处理间无显著差异。

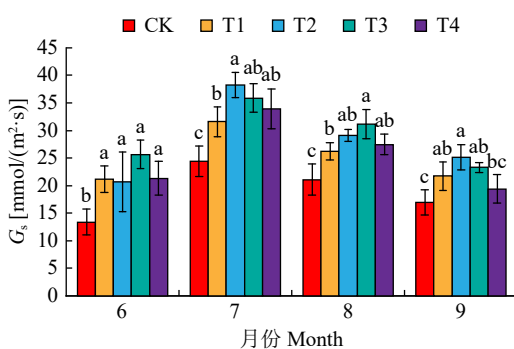


图 3 不同施肥处理对兰州百合 G_s 的影响
Fig.3 Effects of different fertilization treatments on G_s of *Lilium davidii* var. *willmottiae*

C_i 反映植物叶片对 CO_2 的吸收和利用情况。从图 4 可以看出, 不同施肥处理下兰州百合叶片的 C_i 整体变化规律一致, 均呈先降低后增高的趋势。7 月份光照强度增强, 植株光合作用速率加快, CO_2 消耗量增多, 各施肥处理的植株叶片 C_i 均最低, $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 和 $T4$ 处理的植株叶片 C_i 分别为 262.90、330.66、310.62 和 326.49 $\mu mol/mol$, 相较于 CK 处理分别提高 3.71%、30.43%、22.53%、28.79%, $T2$ 与 $T3$ 、 $T4$ 处理间无显著差异。8-9 月随着光照强度和时长降低, 各施肥处理的 C_i 不断上升, 最终叶片 C_i 的顺序为 $T3>T2>T4>T1>CK$ 处理, $T3$ 处理与 $T2$ 和 $T4$ 处理间无显著差异。

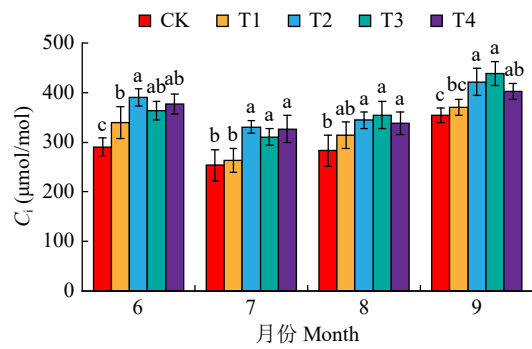


图 4 不同施肥处理对兰州百合 C_i 的影响
Fig.4 Effects of different fertilization treatments on C_i of *Lilium davidii* var. *willmottiae*

2.3 不同施肥处理对兰州百合鳞茎品质指标的影响

蚯蚓粪肥部分替代化肥处理对各项营养指标的影响均优于单一施用化肥处理。由表 5 可知, 可溶性糖含量方面, $T2$ 处理最高, 与 $T3$ 、 $T4$ 处理间无显著差异; $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 和 $T4$ 处理比 CK 处理分别高 10.71%、29.82%、29.11% 和 20.71%。可溶性蛋白质含量方面, $T3$ 处理显著高于 CK 和 $T1$ 处理; $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 和 $T4$ 处理比 CK 处理分别高 13.32%、34.85%、45.80% 和 40.88%。总黄酮含量在各处理间无显著差异, $T2$ 处理的含量最高, $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 和 $T4$ 处理比 CK 处理分别高 3.27%、31.31%、8.88%

表 5 不同处理对兰州百合鳞茎营养品质的影响

Table 5 Effects of different treatments on the nutritional quality of *Lilium davidii* var. *willmottiae* bulbs

处理 Treatment	可溶性糖含量 Soluble sugar content (%)	可溶性蛋白质含量 Soluble protein content (mg/g)	总黄酮含量 Total flavonoid content (mg/g)	总酚含量 Total phenolic content (mg/100g)	Vc 含量 Vc content (mg/100g)
CK	5.60±0.18c	5.48±0.38c	2.14±0.32a	10.38±0.96b	4.74±0.66b
T1	6.20±0.21b	6.21±0.57bc	2.21±0.27a	11.98±1.52ab	5.39±0.49ab
T2	7.27±0.13a	7.39±0.60ab	2.81±0.38a	12.64±1.08ab	5.96±0.57ab
T3	7.23±0.13a	7.99±0.30a	2.33±0.31a	15.28±0.98a	7.28±0.98a
T4	6.76±0.17a	7.72±0.14a	2.30±0.11a	14.87±0.46a	5.79±0.53ab

和 7.48%。总酚含量方面, T3 处理最高, T1、T2、T3、T4 处理比 CK 处理分别高 15.41%、21.77%、47.21%和 43.26%。在 V_c 含量方面, T3 处理同样表现最优, T1、T2、T3 和 T4 处理比 CK 处理分别增加 13.71%、25.74%、53.59%和 22.15%。

2.4 不同施肥处理对兰州百合鳞茎产量和经济效益的影响

不同施肥处理对兰州百合鳞茎产量和经济效益的影响如表 6 所示, 蚯蚓粪肥部分替代化肥处理下鳞茎直径和鲜重均优于单一施用化肥处理, CK 处理的鳞茎直径最低, 为 34.64 mm, 加大化肥减量和蚯蚓粪肥增量后鳞茎直径表现为先升高后下

降, T3 处理的鳞茎直径达到最大值, 为 36.25 mm, T1、T2 和 T4 处理间无显著差异; 鳞茎鲜重在 12.68~15.25 g, 在 T3 处理达到最大值, 显著高于其他施肥处理, T1、T2 和 T4 处理间无显著差异, 但均显著高于 CK 处理; 产量表现为 T3>T2>T4>T1>CK, T3 处理产量最高, 为 1906.25 kg/hm², 较 CK、T1、T2 和 T4 处理分别提高了 20.27%、13.72%、9.01%和 10.67%; 产投比表现为 T3>T2>T4>CK>T1, T3 处理产投比最高, 为 2.86, 显著高于其他处理; 纯收益表现为 T3>T2>T4>T1>CK, T3 处理纯收益最高, 较 CK、T1、T2 和 T4 处理分别提高了 8000.41、7040.61、4795.31 和

表 6 不同施肥处理对兰州百合产量和经济效益的影响

Table 6 Effects of different fertilization treatments on yield and economic benefit of *Lilium davidii* var. *willmottiae*

处理 Treatment	鳞茎直径 Bulb diameter (mm)	鳞茎鲜重 Fresh weight of bulb (g)	产量 Yield (kg/hm ²)	产值 (元/hm ²) Output value (yuan/hm ²)	肥料成本 (元/hm ²) Fertilizer cost (yuan/hm ²)	产投比 Output-input ratio	纯收益 (元/hm ²) Net income (yuan/hm ²)
CK	34.64±0.26b	12.68±0.19c	1585.00±24.27c	47 550.00±728.21c	3343.02	2.59b	29 206.98c
T1	35.05±0.50ab	13.41±0.19b	1676.25±23.77b	50 287.50±713.15b	5120.72	2.50b	30 166.78bc
T2	35.54±0.34ab	13.99±0.25b	1748.75±30.96b	52 462.50±928.87b	5050.42	2.62b	32 412.08b
T3	36.25±0.25a	15.25±0.28a	1906.25±35.34a	57 187.50±1060.24a	4980.11	2.86a	37 207.39a
T4	35.21±0.39ab	13.78±0.18b	1722.50±22.36b	51 675.00±670.76b	4909.81	2.60b	31 765.19bc

鳞茎单价按 30.0 元/kg 计算。肥料成本中蚯蚓粪肥 220 元/t, 尿素 2200 元/t, 过磷酸钙 1800 元/t, 硫酸钾 4100 元/t。其他成本 15 000 元/hm² (包括种子、人工和农药成本)。

The unit price of bulbs is 30.0 yuan/kg. Fertilizer cost include earthworm manure (220 yuan/t), urea (2200 yuan/t), calcium superphosphate (1800 yuan/t) and potassium sulfate (4100 yuan/t). Other costs are calculated at 15 000 yuan/hm² (including seed, labor, and pesticide costs).

5442.20 元/hm²。

3 讨论

化肥中所含的养分高, 肥效快, 但是肥力持续的时间较短, 长期使用还会使土壤理化性质恶化, 而有机肥在提高土壤中有机质和养分含量的同时还能调节土壤结构, 提高作物的产量, 但是肥效较慢^[16-17]。前人^[18-20]研究表明, 有机肥部分替代化肥优于单施化肥或有机肥, 二者可取长补短。石子建等^[18]研究发现, 有机肥替代部分化肥可以缓解土壤酸化、增加土壤有机质含量, 同时对提升玉米的产量和品质也有积极作用。熊廷浩等^[19]研究发现, 有机肥配施化肥可以提高油菜干物质和养分的积累。柳文凯等^[20]研究发现, 有机肥替代部分化肥处理促进了大白菜生长, 提高了叶绿素含量, 增加了干物质的积累量。

在本试验中, 蚯蚓粪肥部分替代化肥显著提高了兰州百合株高、茎粗和叶片数, 鳞茎直径和鲜重均随蚯蚓粪肥部分替代化肥比例的增加呈先增高

后降低的趋势, T2 处理在植株各个生育期的株高、茎粗和叶片数均最高, 说明 T2 处理能明显促进兰州百合地上部的生长发育。T3 处理植株的鳞茎直径和鲜重均达到最大值, 较 CK 处理分别增加 4.65%和 20.27%, 有利于兰州百合地下部的生长。且 T3 处理产量增加 20.27%, 纯收益较 CK 处理增收 8000.41 元/hm²。说明化肥和蚯蚓粪肥合理配施能显著促进兰州百合地上部分的生长发育, 增加地下部鳞茎直径和鲜重, 达到提高鳞茎产量和收益的目的。

光合作用是植物生长中重要的生理代谢过程, 是决定作物生长的根本因素之一, 易受光照时长、光合有效辐射、温度、空气湿度和 CO₂ 浓度等环境因子影响^[21]。本研究中, 通过蚯蚓粪肥部分替代化肥处理不同程度提高了兰州百合叶片的 P_n、T_r、G_s 和 C_i, 与前人关于有机肥部分替代化肥对马铃薯^[22]、玉米^[23]和茄子^[24]等作物光合特性的研究结果基本一致, 这是由于化肥与有机肥配施优化了土壤的养分构成和理化性质, 促进了植物根系的生长

和养分的吸收,将更多的养分传输到了叶片中^[25]。7月份温度升高,光合有效辐射日均值最大,兰州百合叶片的 P_n 、 T_r 和 G_s 最高, C_i 因光合作用消耗 CO_2 量增大达到最低值。8-9月温度降低,光照时长和强度降低,光合作用效率变慢,导致兰州百合叶片 P_n 、 T_r 和 G_s 下降, C_i 上升。这与马彦霞等^[26]的研究结果一致。

蚯蚓粪肥部分替代化肥增加兰州百合鳞茎产量的同时,显著提升了鳞茎的可溶性糖、可溶性蛋白质、 V_c 和总酚的含量。方成等^[27]研究表明,蚯蚓粪肥配施70%化肥处理显著提高了甜糯玉米可溶性糖、淀粉和 V_c 的含量。程亚倩等^[28]研究发现,蚯蚓粪肥配施70%化肥处理较单一化肥处理提高了烟草叶片代谢水平及养分含量,与本试验的研究结果一致。Liu等^[29]研究发现,土壤中低氮可以促进药用菊花总黄酮的形成和积累。本研究发现,蚯蚓粪肥部分替代化肥对鳞茎总黄酮含量的提升效果不显著,可能与土壤中氮素水平较高抑制植株总黄酮的合成有关。此外,目前试验结果仅对采收期鳞茎的总黄酮含量进行比较,也可能与采样的时期和部位有关。本研究比较分析了天津地区黏壤土质下兰州百合蚯蚓粪肥部分替代化肥当年的施肥效果,因不同地区间土壤类型和气候存在差异,当前试验结论在异地推广时应对其在原产地开展同方案试验和多年栽培下的施肥效果进行深入研究。

4 结论

蚯蚓粪肥部分替代化肥可以显著促进兰州百合植株生长、提高叶片光合作用和鳞茎品质,且以施用80%化肥配施10 800 kg/hm²蚯蚓粪肥处理最有利于兰州百合地上部的生长,70%化肥配施12 000 kg/hm²蚯蚓粪肥处理的地下鳞茎产量和品质最佳。与纯化肥处理相比,化肥减量增配蚯蚓粪肥均可提高鳞茎可溶性糖、可溶性蛋白质、总黄酮、总酚和 V_c 等有益成分含量。且在施用70%化肥配施12 000 kg/hm²蚯蚓粪肥处理下,经济效益最佳。

参考文献

- [1] 王震宝,师桂英,樊生丰,等.不同品种兰州百合的生长发育特性、产量特性的对比试验及综合分析.甘肃农业大学学报,2022,57(3):52-57.
- [2] 陈晓莉,杨宏羽,韩佳,等.化肥减量配施微生物菌肥对兰州百合光合生理特性的影响.西北植物学报,2024,44(9):1365-1375.
- [3] Shi Y W, Niu X X, Chen B Z, et al. Chemical fertilizer reduction combined with organic fertilizer affects the soil microbial community and diversity and yield of cotton. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1295722.
- [4] 侯丽丽,王伟,崔新菊,等.化肥减量配施有机肥对小麦生长、光合和产量的影响.麦类作物学报,2021,41(4):475-482.
- [5] 鲁伟丹,周远航,马小龙,等.不同比例有机肥替代化肥对甜菜植株养分及产量的影响.新疆农业科学,2024,61(7):1631-1639.
- [6] 袁辉,谢军红,李玲玲,等.有机肥替代化肥对马铃薯生长生理特性及产量的影响.甘肃农业大学学报,2024,59(4):35-43.
- [7] 白晓凤,陆伟,张宇昌,等.蚯蚓粪对草炭型育苗基质及黄瓜幼苗的影响.中国瓜菜,2024,37(10):75-81.
- [8] 吴东阳,吴家欢,李伟志,等.蚓粪、猪粪配施化肥对土壤质量、辣椒生长及品质的影响.生态环境学报,2024,33(9):1416-1425.
- [9] 颜振峰,林晶晶,张林琳.化肥减量配施蚯蚓粪对连作番茄产量、养分利用及经济效益的影响.江苏农业科学,2025,53(2):183-190.
- [10] 黄剑.不同比例蚯蚓粪有机肥替代化肥对网纹瓜生长及土壤的影响.黑龙江农业科学,2025(6):53-59.
- [11] 李合生.植物生理生化实验原理和技术.北京:高等教育出版社,2000:195-197.
- [12] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导.北京:中国轻工业出版社,2017:28-37.
- [13] Luo T, Chen S R, Zhang H H, et al. Phytochemical composition and potential biological activities assessment of raspberry leaf extracts from nine different raspberry species and raspberry leaf tea. *Journal of Berry Research*, 2020, 10(2): 295-309.
- [14] Chen W D, Xie C Y, He Q Q, et al. Improvement in color expression and antioxidant activity of strawberry juice fermented with lactic acid bacteria: a phenolic-based research. *Food Chemistry*, 2023, 17: 100535.
- [15] 中华人民共和国卫生部.食品安全国家标准食品添加剂 维生素C(抗坏血酸):GB/T 14754-2010.北京:中国标准出版社,2010.
- [16] 郭雅琨,尹艺璐,李建勇,等.肥料减量对番茄植株生长、果实品质及需肥规律的影响.上海交通大学学报(农业科学版),2019,37(6):248-255.
- [17] 李其勇,夏武奇,李星月,等.化肥减量配施商品有机肥对白菜生长及土壤养分的影响.北方园艺,2022(20):41-47.
- [18] 石子建,唐鹏,许竹激,等.化肥减量配施有机肥对鲜食玉米产量品质和土壤理化性质的影响.江苏农业科学,2024,52(5):77-82.
- [19] 熊廷浩,资涛,张媛,等.化肥减量条件下不同有机肥用量对油菜养分利用和产量的影响.作物杂志,2021(3):133-139.
- [20] 柳文凯,雷永忠,王莉,等.化肥减量配施生物有机肥对高原夏季露地大白菜生长生理及养分吸收的影响.江西农业大学学报,2024,46(2):340-355.
- [21] 黄小龙,张艳芳,郭树春,等.光强对山药叶片结构和光合特性的影响.植物生理学报,2024,60(5):808-822.
- [22] 谭伟军,王娟,黄凯,等.有机肥氮替代化肥氮对马铃薯光合特性的影响.中国种业,2021(1):73-75.
- [23] 吴霞玉,李盼,韦金贵,等.减量灌水及有机无机肥配施对西北灌区玉米光合生理、籽粒产量及品质的影响.作物学报,2024,50(4):1065-1079.
- [24] 申正香,谈守玮.景电灌区化肥减量配施生物有机肥对茄子生长特性、产量及品质的影响.节水灌溉,2022(6):72-77,84.
- [25] 宋文博,杨鹏九,刘军,等.减施化肥对烤烟叶片光合特性、叶绿素荧光特性和产质量的影响.黑龙江农业科学,2015

- (10): 70-74.
- [26] 马彦霞, 陈静茹, 牛成达, 等. 水肥耦合对河西冷凉灌区春茬娃娃菜生长和光合特性的影响. 寒旱农业科学, 2025, 4(2): 117-123.
- [27] 方成, 代子雯, 李伟明, 等. 化肥减施配施不同有机肥对甜糯玉米产量和品质的影响. 生态学杂志, 2021, 40(5): 1347-1355.
- [28] 程亚倩, 周洁, 李司童, 等. 蚯蚓粪肥对陕西烟区烤烟生长及品质的影响. 西南农业学报, 2020, 33(2): 347-356.
- [29] Liu D H, Liu W, Zhu D W, et al. Nitrogen effects on total flavonoids, chlorogenic acid, and antioxidant activity of the medicinal plant *Chrysanthemum morifolium*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2010, 173(2): 268-274.

Effects of Earthworm Manure Partially Replacing Chemical Fertilizer on Photosynthetic Characteristics, Quality and Yield of *Lilium davidii* var. *willmottiae*

Zhang Zhuo, Nie Jiangli, Qiu Xiaokun, Su Jiajia, Ren Junhan, Liu Guanghui, Liu Yanjun, Pei Yi

(College of Horticulture and Landscape Architecture, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China)

Abstract Taking *Lilium davidii* var. *willmottiae* as the experimental material, using the field experiment method and applying 100% chemical fertilizer as the control (CK), we studied 90% chemical fertilizer combined with 9600 kg/ha earthworm manure (T1), 80% chemical fertilizer combined with 10 800 kg/ha earthworm manure (T2), 70% chemical fertilizer combined with 12 000 kg/ha earthworm manure (T3), 60% chemical fertilizer combined with 13 200 kg/ha earthworm manure (T4). The effects of different fertilization treatments on the growth, photosynthetic characteristics, bulb quality and yield of *L. davidii* var. *willmottiae* were studied. The results showed that the partial replacement of chemical fertilizer with earthworm manure could accelerate the growth of aboveground parts and underground bulbs of *L. davidii* var. *willmottiae* to some extent. T2 treatment significantly improved the plant height, stem diameter and leaf number at each growth stage, and T3 treatment was the most beneficial to the growth of bulbs, with the bulb diameter and fresh weight increased by 4.65% and 20.27% respectively compared with CK treatment. When earthworm manure partially replaced chemical fertilizer, the photosynthetic characteristics of leaves were improved to varying degrees. The net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance of plant leaves reached the peak under T2 treatment, which were increased by 34.52%, 37.20% and 56.78% respectively compared with CK treatment. The intercellular CO₂ concentration reached the peak under T3 treatment, which was 30.43% higher than CK treatment, but there was no significant difference between T3 and T2 treatments. The nutritional quality of bulbs treated with earthworm manure partially replacing chemical fertilizer was better than CK treatment, and the soluble sugar content was the highest under T2 treatment, which was 29.82% higher than that of the CK treatment. The contents of soluble protein, total phenol and vitamin C were the highest under T3 treatment, which were increased by 45.80%, 47.21% and 53.59% respectively compared with CK treatment. But there was no significant difference in the content of total flavonoids among the treatments. On the whole, 70% chemical fertilizer combined with 12 000 kg/ha earthworm manure treatment can significantly improve the quality and yield of bulbs, with the best economic benefits.

Key words *Lilium davidii* var. *willmottiae*; Chemical fertilizer; Earthworm castings; Photosynthetic characteristics; Bulb quality; Yield