

滴灌施磷对甜菜磷养分吸收及磷肥利用率的影响

王 娟¹, 白如霄², 陈英花¹, 杨克明¹, 崔 健¹, 危常州^{1*}

[1. 石河子大学农学院, 新疆 石河子 832003; 2. 新疆生产建设兵团
第九师农业科学研究所 (畜牧科学研究所), 新疆 塔城 834601]

摘 要: 采用随机区组设计, 以塔额盆地主栽甜菜品种 (Beta796) 为试验材料开展大田试验。在氮、钾施用量相同的情况下, 设置滴灌施磷 (P_2O_5) $0\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (P_0)、 $120\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (P_1)、 $180\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (P_2) 和 $240\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (P_3) 4 个处理, 研究甜菜主要生育时期磷养分吸收、积累和分配规律, 分析甜菜磷养分利用效率, 以期对甜菜高产、优质、高效生产中磷肥管理提供理论依据。结果表明, 滴灌施磷能增加甜菜干物质积累量, P_1 、 P_2 和 P_3 处理干物质积累量较 P_0 处理分别增加 16.6%、24.7% 和 27.9%, 其中 P_2 、 P_3 处理间差异不显著。甜菜干物质积累 Logistic 方程显示施磷能显著提高甜菜干物质最大累积速率和平均累积速率, 最高分别可达 443.7 和 $185.7\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。甜菜磷积累总量随施磷增加而增加, 有利于提高生育后期甜菜磷积累量, 尤其是甜菜地下部的磷积累量; 收获期 P_3 处理地下部磷积累量为 $74.25\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较 P_0 、 P_1 和 P_2 处理分别显著增加 76.7%、24.8% 和 12.1%。施磷对收获期甜菜磷素在地上部、地下部分配无显著影响。试验结果表明滴灌施磷显著提高了甜菜产量, 增加了甜菜块根的含糖量及产糖量。 P_1 、 P_2 和 P_3 处理块根产量比 P_0 处理分别增加 11.57%、18.58% 和 20.89%, 甜菜蔗糖含量比 P_0 处理分别增加 1.18%、2.90% 和 3.37%。施磷对甜菜品质影响不大。施磷增加了磷肥的当季利用率, 不同处理磷肥利用率可达 31.54% ~ 39.66%。 P_2 处理能增加磷素农学效率, 磷肥偏生产力则随着施磷量增加而减少。综合甜菜相对产糖量、经济效益及磷肥利用效率, 滴灌施磷 (P_2O_5) $85.1 \sim 187.4\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 可以实现甜菜高产和磷肥高效利用的目的。

关键词: 甜菜; 干物质积累; 磷养分吸收; 产量; 磷肥利用率

磷是植物生长发育必需的营养元素^[1], 以有机和无机形式在植株体内直接参与植物光合产物的合成和运转^[2], 也参与甜菜光合作用中光合磷酸化和碳循环的许多过程^[3-5]。充足的磷素供给是甜菜高产高糖的物质基础, 磷素缺乏会造成物质代谢失调, 阻碍糖分运输, 不利于甜菜产量形成及糖分积累^[6-7], 磷对甜菜块根的产量构成及含糖率具有重要作用^[7-9]。磷在土壤中的移动性较差, 施入的磷肥极易被固定, 当季利用率低^[10-11]。滴灌能有效实现水肥一体化, 减少水肥损失并提高水肥利用效率以及作物的产量和品质^[12-14]。近年来, 甜菜滴灌施肥的相关研究大部分集中在甜菜氮素养分管理方面^[15-19], 而针对滴灌条件下甜菜磷肥管理及养分积累和分配的研究较少。

在新疆高糖生产区塔额盆地甜菜生产中, 通过滴灌分次水肥一体化施用磷肥, 研究施磷对甜菜磷养分积累与分配、产量及磷肥利用率的影响, 以期对当地滴灌甜菜高产高效生产磷肥的合理施用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于 2019 年在新疆塔额盆地 168 团一连 ($41^{\circ}30' \text{ N}$, $112^{\circ}64' \text{ E}$, 海拔 1780 m) 进行。该区域属中温带大陆性气候, 有效积温 $2800 \sim 3200^{\circ}\text{C}$, 无霜期 $126 \sim 140\text{ d}$ 。供试品种 Beta796 (*Beta vulgaris* L.)。供试土壤为砂壤土, $0 \sim 20\text{ cm}$ 土壤有机质含量 $19.8\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $50.38\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $15.42\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $205.8\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值 7.2。

1.2 试验设计

试验共设 4 个处理, 以不施磷肥处理为对照 (P_0), 其余 3 个处理磷素施用量分别为 120、180、 $240\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别记作 P_1 、 P_2 和 P_3 。N 用量为 $210\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O 用量为 $150\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 氮、磷、

收稿日期: 2021-04-09; 录用日期: 2021-07-17

基金项目: 新疆生产建设兵团重点领域科技攻关计划 (2018AB036); 石河子大学高层次人才科研启动项目 (RCZX201519)。

作者简介: 王娟 (1981-), 副教授, 博士, 研究方向为作物营养与施肥。E-mail: symwj@163.com。

通讯作者: 危常州, E-mail: changzhouwei@126.com。

钾肥均为灌溉施肥,按各时期比例全部追施。磷肥(磷酸二铵,18-46-0)分5次滴灌施用,第一次(块根形成分化期)为施用总量的30%;第二次(叶丛快速生长期)为施用总量的25%;第三次(叶丛快速生长期)为施用总量的20%;第四次(块根及糖分增长期)为施用总量的15%;第五次(块根及糖分增长期)为施用总量的10%。氮肥(尿素,0-0-46)和钾肥(硫酸钾,0-0-50)也在以上生育期分比例同磷肥一起通过灌溉施肥施入土壤。全生育期灌水量为 $5625\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,共灌溉9次。

小区面积为 150 m^2 ,每个处理重复3次,田间随机排列,4月7日播种,10月11日收获。播种行距45 cm,株距19 cm,理论株数为 $11.7\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。灌溉时间与当地甜菜大田生产保持一致,其他栽培管理同一般高产田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 甜菜干物质

在甜菜生长苗期(5月16日)、块根形成分化期(6月20日)、叶丛快速生长期(7月16日)、块根及糖分增长期(8月20日)、糖分积累期(9月11日)、收获期(10月11日)取各小区代表性植株5株带回实验室,将植株分为地上部和地下部。将地上部、地下部植株样品用自来水洗净后,再用蒸馏水冲洗2~3次,在 105°C 下杀青30 min。地上部在 75°C 烘箱中烘干至恒重;地下部块根置于通风干燥处晾干(块根中后期含糖量较高,杀青后直接烘干易流失糖分),再放置 75°C 下烘干至恒重,称量植物样品干重。

1.3.2 甜菜植株含磷量

烘干样品粉碎后过0.25 mm筛。植株全磷采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,使用钒钼黄比色法测定。

1.3.3 产量测定

收获期对各处理未取样的小区进行实收。每个处理量取 6.67 m^2 ,将所有甜菜块根完好挖出,按照国家标准切削^[20],清点块根数,称量块根鲜质量。

1.3.4 甜菜品质的测定

每个小区选取具有代表性的甜菜块根10株,测定甜菜含糖率。将甜菜块根清洗干净后,使用甜菜块根取样器在叶痕处以 45° 斜插入甜菜块根,取出条状样品,使用榨汁钳榨取汁液,用手持式折光仪(日本,爱拓)分别测定块根锤度值,乘以0.83得到块根含糖率^[21]。利用甜菜品质分析仪(德国,维尼玛)进行 α -氨基氮、 K^+ 和 Na^+ 含量的测定。

1.4 相关参数计算

甜菜磷素积累量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)=植株磷含量(%) $\times$ 单位面积干物质重($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

磷肥利用率(%)=(施磷处理甜菜收获时磷吸收养分总量-未施磷处理甜菜磷吸收养分总量)/磷肥施入量 $\times 100$

磷肥偏生产力($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)=施磷处理收获期块根产量/磷肥施入量

磷肥农学效率($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)=(施磷处理甜菜块根产量-不施磷处理甜菜块根产量)/磷肥施入量

1.5 数据分析

采用Excle 2016对数据进行处理和图表制作,采用SPSS 19.0对数据进行差异性检验和Logistic方程的拟合。

2 结果与分析

2.1 施磷对甜菜干物质积累的影响

不同施磷处理甜菜总干物质积累量随生育期持续增加,在收获期达到最大值(图1), P_0 、 P_1 、 P_2 和 P_3 处理的干物质积累量分别为25721.9、29762.5、31462.8和32428.5 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。甜菜块根分化形成期(出苗后60 d)未施磷肥,不同处理间无显著差异。甜菜干物质积累量在不同生育期均表现为随施磷量的增加而增加。叶丛快速生长期施磷处理干物质积累显著高于 P_0 处理, P_1 、 P_2 和 P_3 处理干物质积累量较 P_0 处理分别增加16.6%、24.7%和27.9%;但 P_2 、 P_3 处理间干物质积累差异不显著。随着生育期的推进,在块根及糖分增长期、糖分积累期至收获前各处理间干物质积累量差异逐渐增大, P_0 处理干物质积累差异显著。

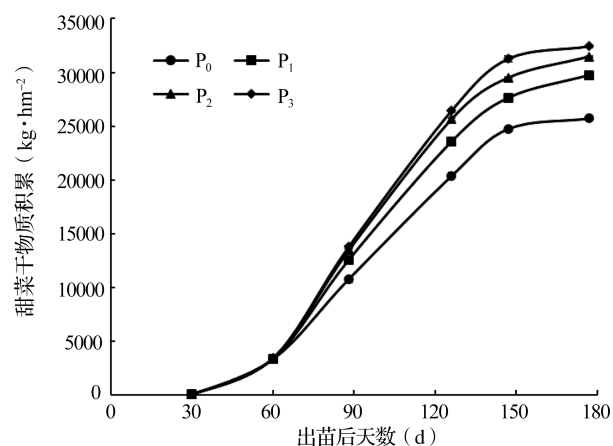


图1 不同施磷量下甜菜干物质积累量

通过对不同生育时期甜菜干物质积累量进行 Logistic 方程拟合 (表 1) 发现, 不同施磷处理干物质积累模型相关系数 (R^2) 均达极显著水平 ($P < 0.01$)。计算方程相关参数可知, P_0 处理干物质积累最大速率出现时间 (T) 为 96.2 d, 晚于其他施磷处理。不同施磷处理干物质积累快速增长的开始时间 (t_1) 在出苗后 69.6 ~ 70.4 d, 结束时间 (t_2) 在出苗后 118.7 ~ 122.8 d。不同处理干物质快速增长持续期 (Δt) 随施磷量的增加而减少, 为 53.2 ~ 48.5 d。干物质最大增长速率 ($V_{\max}$)

和平均增长速率 (V_{mean}) 随施磷量的增加而增加; 不同处理 $V_{\max}$ 分别为 324.8、376.8、423.3 和 443.7 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 较 P_0 处理分别增加 16.0%、30.3% 和 36.6%。不同处理 V_{mean} 分别为 149.2、169.6、178.3 和 185.7 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 较 P_0 处理分别增加 13.7%、19.5% 和 24.5%。以上结果均表明, 施磷可以在短时间内快速积累干物质, 显著增加甜菜干物质积累量以及提高干物质积累速率, 减少干物质快速积累持续的天数。

表 1 不同施磷量下甜菜干物质积累的模型及特征值

处理	Logistic 方程	R^2	T (d)	t_1 (d)	t_2 (d)	Δt (d)	$V_{\max}$ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	V_{mean} ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)
P_0	$Y=26253.8/(1+e^{4.760-0.049t})$	0.996	96.2	69.6	122.8	53.2	324.8	149.2
P_1	$Y=29858.2/(1+e^{4.834-0.050t})$	0.996	95.8	69.7	121.9	52.2	376.8	169.6
P_2	$Y=31376.1/(1+e^{5.087-0.054t})$	0.997	94.3	69.9	118.7	48.8	423.3	178.3
P_3	$Y=32684.1/(1+e^{5.142-0.054t})$	0.997	94.7	70.4	118.9	48.5	443.7	185.7

注: t : 出苗后天数; y : 干物质积累量; T : 最大干物质积累速率出现时间; t_1 : 进入干物质快速增长期的时间拐点; t_2 : 结束快速增长期的时间拐点; Δt : 快速增长持续时间; $V_{\max}$: 干物质最大积累速率; V_{mean} : 干物质平均积累速率。

2.2 施磷对甜菜磷积累与分配的影响

不同施磷处理对甜菜磷积累量的影响如图 2 所示。在甜菜块根形成分化期未施用磷肥, 各处理磷积累总量无显著差异。叶丛快速生长期和块根及

糖分增长期, 甜菜地上部、地下部磷积累量显著增加, 施磷处理磷积累量显著高于 P_0 处理, 且不同处理间差异显著, 其中块根及糖分增长期甜菜 P_1 、 P_2 和 P_3 处理整株磷积累量较 P_0 处理分别增加

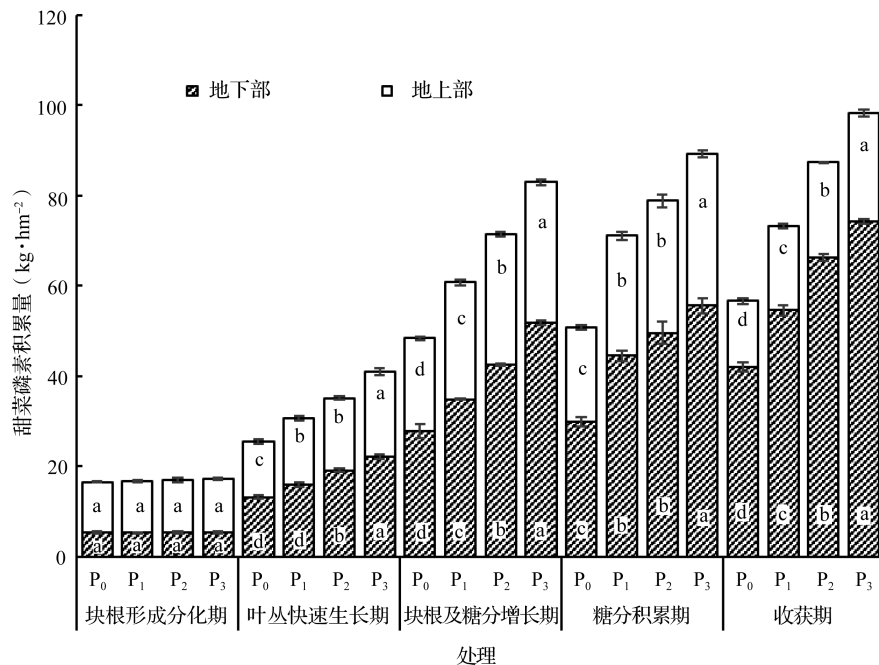


图 2 不同施磷量下甜菜不同器官磷积累量

注: 小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

25.6%、47.8% 和 71.7%。在糖分积累期,甜菜地上部磷积累变缓,施磷处理磷积累量显著高于 P_0 处理,不同处理地上部磷积累量分别为 20.96、26.55、29.26 和 33.67 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,但 P_1 、 P_2 处理间差异不显著;地下部磷积累量随施磷量的增加而增加,且不同处理间差异显著。至收获期,由于地上部叶片脱落,磷积累量较生育前期减少,不同施磷处理地上部磷积累量分别为 14.64、18.66、21.11 和 23.99 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,但不同处理间差异显著;地下部磷积累量仍在增加, P_3 处理地下部磷积累量为 74.25 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,较 P_0 、 P_1 和 P_2 处理显著增加 76.7%、24.8% 和 12.1%;甜菜磷积累总量随施磷量增加而增加,不同处理间差异显著。综上,施磷有利于提高生育后期甜菜磷积累量,其中对收获器官磷积累量的增加更显著。

不同施磷处理下植株地上部、地下部磷分配率如表 2 所示。甜菜块根分化期地上部磷分配比例大于地下部,为 67.59% ~ 68.71%;随生育期

表 2 不同施磷量下甜菜磷分配率 (%)

生育时期	处理	地上部	地下部
块根形成分化期	P_0	68.07 ± 0.89a	31.93 ± 0.89a
	P_1	67.59 ± 0.65a	32.41 ± 0.65a
	P_2	68.39 ± 1.66a	31.61 ± 1.66a
	P_3	68.71 ± 1.19a	31.29 ± 1.19a
叶丛快速生长期	P_0	48.23 ± 0.48a	51.77 ± 0.48a
	P_1	47.67 ± 0.64a	52.33 ± 0.64a
	P_2	45.61 ± 0.30a	54.39 ± 0.30a
	P_3	46.16 ± 1.31a	53.84 ± 1.31a
块根及糖分增长期	P_0	42.60 ± 1.66b	57.40 ± 1.66a
	P_1	42.54 ± 0.49b	57.46 ± 0.49a
	P_2	40.44 ± 0.57ab	59.56 ± 0.57ab
	P_3	37.62 ± 0.61a	62.38 ± 0.61b
糖分积累期	P_0	41.24 ± 1.10a	59.76 ± 1.10a
	P_1	37.37 ± 1.19a	62.63 ± 1.19a
	P_2	37.10 ± 2.00a	62.90 ± 2.00a
	P_3	37.73 ± 0.47a	62.27 ± 0.47a
收获期	P_0	25.84 ± 0.49a	74.16 ± 0.49a
	P_1	25.49 ± 1.00a	74.51 ± 1.00a
	P_2	24.17 ± 0.16a	75.83 ± 0.16a
	P_3	24.42 ± 0.55a	75.58 ± 0.55a

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

的推进,在叶丛快速生长期甜菜地上部磷分配率降低,为 45.61% ~ 48.23%,以上生育时期甜菜地上部、地下部磷分配率在不同处理间均无显著差异。随施磷量的增加,块根及糖分增长期甜菜地下部磷积累量呈增加的趋势,其中 P_3 处理地下部磷分配率达 62.38%,高于 P_2 处理地下部磷分配率 59.56%;显著高于 P_0 和 P_1 处理。在块根糖分积累期,甜菜地下部磷分配比例随施磷量增加而增加,不同处理地下部磷分配比例分别为 59.76%、62.63%、62.90% 和 62.27%;但不同处理间差异不显著。收获期不同处理甜菜块根地下部磷分配比例为 74.16% ~ 75.83%,达最大值,不同施磷处理间差异不显著。综上,甜菜磷素吸收主要分布在地下部,各处理磷素地上/地下部分配率差异不大。

2.3 不同施磷量对甜菜产量品质及经济效益的影响

表 3 数据显示,甜菜产量随施磷量的增加而增加,施磷处理产量显著高于 P_0 处理, P_1 、 P_2 和 P_3 处理块根产量分别比 P_0 处理增加 11.57%、18.58% 和 20.89%, P_3 处理产量最高,达 108770 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_3 处理显著高于 P_1 处理,但与 P_2 处理无显著差异。收获期不同施磷处理甜菜块根蔗糖含量随施磷量的增加而增加;与 P_0 处理相比, P_1 、 P_2 和 P_3 处理蔗糖含量分别增加 1.18%、2.90% 和 3.37%, P_3 、 P_2 处理块根蔗糖含量显著高于 P_0 处理, P_1 与 P_0 处理间蔗糖含量差异不显著。施磷处理蔗糖产量显著高于 P_0 处理, P_3 处理蔗糖产量为 18681 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,与 P_2 处理无显著性差异,显著高于其他处理。不同施磷处理对甜菜块根中 Na^+ 含量无显著性影响,不同处理间无显著性差异。 P_3 处理块根 K^+ 与 $\alpha\text{-N}$ 含量表现出相同的趋势, P_0 、 P_1 和 P_2 处理间 K^+ 含量与 $\alpha\text{-N}$ 含量无显著性差异,在高施磷量情况下,收获期 P_3 块根中 K^+ 和 $\alpha\text{-N}$ 含量显著低于 P_2 处理。综上,施磷能显著提高甜菜块根的含糖率,但对甜菜块根品质无显著性影响。

甜菜产量效益和磷肥增产效益均随施磷量的增加而增加;施磷处理产量效益显著高于 P_0 处理,但 P_3 与 P_2 处理间产量效益无显著性差异。与 P_0 处理相比, P_3 、 P_2 和 P_1 处理的磷肥增产效益分别为 5546、5262 和 3198 元 $\cdot \text{hm}^{-2}$,经济效益分别提高 14.54%、13.32% 和 7.89%,施磷能够提高甜菜的经济效益。

表 3 不同施磷量下甜菜产量、品质及经济效益

指标	处理			
	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃
产量 (kg · hm ⁻²)	89975 ± 2216c	100385 ± 985b	106695 ± 1009ab	108770 ± 1213a
含糖率 (%)	16.09 ± 0.17c	16.28 ± 0.08bc	16.62 ± 0.31b	17.18 ± 0.33a
产糖量 (kg · hm ⁻²)	14476 ± 325c	16340 ± 185b	17735 ± 251a	18681 ± 251a
Na ⁺ (mmol · 100 g ⁻¹)	0.99 ± 0.03a	0.94 ± 0.001a	1.13 ± 0.04a	1.07 ± 0.29a
K ⁺ (mmol · 100 g ⁻¹)	4.26 ± 0.41ab	4.18 ± 0.16ab	4.53 ± 0.09a	3.62 ± 0.08b
α-N (mmol · 100 g ⁻¹)	1.38 ± 0.38ab	1.55 ± 0.05ab	1.79 ± 0.07a	1.02 ± 0.16b
产量效益 (元 · hm ⁻²)	37790 ± 1140c	42162 ± 507b	44812 ± 519a	45683 ± 624a
增产比 (%)	—	11.567	18.580	20.890
磷肥成本 (元 · hm ⁻²)	—	1174	1760	2348
磷肥增产效益 (元 · hm ⁻²)	—	3198	5262	5546

注: 甜菜块根收购价格为 0.42 元 · kg⁻¹; 磷酸二铵 (滴灌水溶肥) 价格为 4.5 元 · kg⁻¹。

2.4 不同施磷量对甜菜磷肥利用效率的影响

表 4 结果表明, 随施磷量的增加, 磷肥当季利用率呈增加趋势, 达 31.54% ~ 39.66%。甜菜磷肥农学效率呈先增大后减小的趋势, P₂ 处理磷素农学效率最大, 为 92.89 kg · kg⁻¹, 分别较 P₁、P₃ 处理增加 16.80%、18.6%。磷肥偏生产力则随着施磷量增加而减少, P₁、P₂ 和 P₃ 处理的磷肥偏生产力从 836.54 kg · kg⁻¹ 降低至 592.75 和 453.21 kg · kg⁻¹, P₂ 和 P₃ 处理的磷肥偏生产力较 P₁ 处理分别下降 29.14% 和 45.82%。

表 4 不同施磷量下的甜菜磷肥利用效率

处理	磷肥当季利用率 (%)	磷肥农学效率 (kg · kg ⁻¹)	磷肥偏生产力 (kg · kg ⁻¹)
P ₀	—	—	—
P ₁	31.54	86.75	836.54
P ₂	39.02	92.89	592.75
P ₃	39.66	78.31	453.21

2.5 甜菜相对产糖量、经济效益、肥料利用率效应方程及磷肥推荐用量

以甜菜不同施磷处理最高产糖量、最高经济效益和最高利用率为 100%, 分别计算不同处理相对产糖量、经济效益、肥料利用率的百分比。采用二元一次方程模拟施肥量与甜菜相对产糖量、相对经济效益及相对肥料利用率的效应方程 (图 3), 且不同肥料效应方程均达到极显著水平。根据甜菜相对产糖量、相对经济效益及相对肥料利用率的肥料效应方程, 甜菜相对产糖量达 95% 时磷肥施用量为 187.4 kg · hm⁻²; 甜菜相对经济效益达 95% 时磷肥施用量为 85.1 kg · hm⁻²; 甜菜相对磷肥利用

率达 95% 时磷肥施用量为 161.8 kg · hm⁻²。产糖量能够反映制糖企业利益, 相对经济效益能够反映农户利益, 综合二者收益并结合相对肥料利用率, 当地种植甜菜滴灌推荐施磷 (P₂O₅) 量为 85.1 ~ 187.4 kg · hm⁻²。

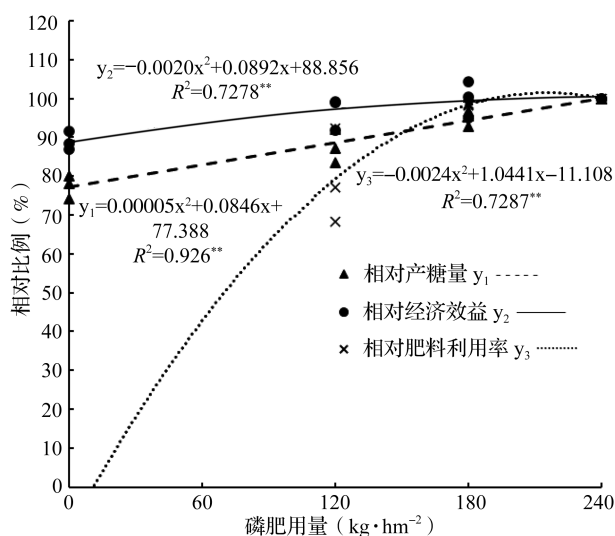


图 3 甜菜相对产糖量、经济效益、肥料利用率效应方程

3 讨论

合理施用磷肥是调控作物生长发育与产量形成的重要措施。研究表明, 甜菜植株干物质积累量与施磷量呈正相关, 提高施磷量能增加甜菜各器官干物质积累量^[21-22], 甜菜各生育时期总吸磷量与施磷量均呈极显著正相关^[23]。多数研究结果表明甜菜产量随施磷量的增加而显著增加^[24-26], 磷肥促进甜菜块根糖分的积累, 且随着磷肥施用量的增加甜菜含糖率、产糖量均增加^[24, 27-29]; 但也有研

究表明磷肥对块根含糖率没有明显的影响^[30], 本研究结果表明, 随施磷量的增加甜菜产量、含糖率及产糖量均呈增加的趋势。不同地区最佳磷肥施用量存在较大差异, 东北产区磷肥 (P_2O_5) 推荐量为 $47.94 \sim 92.06 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[28-29, 31], 内蒙古产区磷肥 (P_2O_5) 推荐量为 $52.5 \sim 248 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[15, 26, 32-34]; 本研究结果表明, 磷肥推荐量 (P_2O_5) 为 $187.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时甜菜能获得较高的产糖量, 高于曹禹等^[35] 在新疆伊犁产区的推荐量 (P_2O_5 $138 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。不同地区土壤磷养分供应、产量水平、栽培模式及灌溉方式等多种因素存在差异, 因此导致不同地区磷肥推荐用量也存在较大差异。胡伟等^[36] 多点试验结果表明, 甜菜磷肥的利用率均偏低, 平均为 15.38%; 本文结果表明甜菜磷肥利用率在 31.54% ~ 39.66% 之间, 高于孙洪仁等^[37] 提出我国甜菜磷肥当季利用率大多在 10% ~ 30% 之间的结论。这可能是以往研究中磷肥多进行撒施或条施, 而本研究磷肥是水肥一体化分次施用, 可以将磷肥集中施用在根系附近, 促进根系吸收磷肥^[38], 减少磷肥在土壤中的固定, 从而提高磷肥利用效率^[10, 12]。因此, 在本试验条件下, 滴灌施用磷肥 (P_2O_5) $85.1 \sim 187.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 是当地甜菜生产较为适宜的推荐用量。

4 结论

滴灌施磷能增加甜菜干物质积累量和磷素积累量, 提高干物质的最大累积速率及平均积累速率。施磷有利于提高生育后期甜菜磷积累量, 甜菜磷积累主要分布在地下部, 但施磷对甜菜收获期磷素地下部分分配率的影响不显著。施磷能提高甜菜磷肥利用率, 降低甜菜磷肥偏生产力。综合甜菜产糖量、经济效益和磷肥利用率, 当地甜菜生产中滴灌施用磷肥 (P_2O_5) 的推荐用量为 $85.1 \sim 187.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

参考文献:

- [1] 孙博, 李帅帅, 周毅, 等. 不同轮作模式下优化施肥对水稻产量及磷素积累与分配的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2020, 43 (4): 658-666.
- [2] 周建朝, 范晶, 王孝纯, 等. 磷胁迫下不同基因型甜菜的光合特征 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (4): 910-916.
- [3] 邵科. 甜菜 (*Beta vulgaris* L.) 块根和含糖率增长与蔗糖代谢酶的关系及其营养调控的生理基础与实践 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [4] Rao I M, Terry N. Leaf phosphate status, photosynthesis, and carbon partitioning in sugar beet (IV. Changes with time following increased supply of phosphate to low-phosphate plants) [J]. Plant Physiology, 1995, 107 (4): 1313-1321.
- [5] Daniel P, Schachman D P, Robert J R, et al. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell [J]. Plant Physiology, 1998, 116 (2): 447-453.
- [6] 韩艳芬. 甜菜块根中营养成分与根重和含糖率关系的初步研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- [7] 郭九峰, 张家骅, 邵金旺. 甜菜不同类型品种叶部磷素差异及磷与块根糖分关系的研究 [J]. 中国甜菜, 1992 (2): 3-10.
- [8] 智燕凤. 肥料用量与种植密度对甜菜产量和品质的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
- [9] Barlog P, Grzebisz W, Peplinski K, et al. Sugar beet response to balanced nitrogen fertilization with phosphorus and potassium part III. dynamics of white sugar yield development [J]. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 2016, 22 (2): 197-204.
- [10] 邢海峰, 石晓华, 杨海鹰, 等. 磷肥分次滴灌施用提高马铃薯群体磷素吸收及磷利用率的作用 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (4): 987-992.
- [11] 张炎, 姚银坤, 胡伟, 等. 施磷对棉花磷素积累、分配、利用及产量的影响 [J]. 新疆农业科学, 2020, 57 (11): 2004-2011.
- [12] 李青军, 张炎, 哈丽哈什·依巴提, 等. 膜下滴灌棉花对 3 种水溶性磷肥的利用效率和产量响应 [J]. 棉花学报, 2018, 30 (2): 172-179.
- [13] 侯云鹏, 孔丽丽, 尹彩侠, 等. 覆膜滴灌下氮肥与种植密度互作对东北春玉米产量、群体养分吸收与转运的调控效应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27 (1): 1-12.
- [14] 张皓禹, 张君, 张凤麟, 等. 滴灌条件下不同磷肥品种对土壤磷有效性及玉米产量的影响 [J]. 水土保持学报, 2019, 33 (2): 189-195.
- [15] 武俊英, 张永丰, 张少英, 等. 水肥耦合对地膜甜菜产量和品质的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2016, 35 (4): 87-91.
- [16] 苏继霞, 王开勇, 费聪, 等. 氮肥运筹对干旱区滴灌甜菜氮素利用及产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36 (1): 72-75.
- [17] 徐林峰, 戴宇祥, 周红亮, 等. 氮素运筹对干旱区滴灌甜菜生长的影响 [J]. 中国糖料, 2019, 41 (3): 40-44.
- [18] 李智. 膜下滴灌甜菜水氮耦合的生理效应 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [19] 李智, 李国龙, 孙亚卿, 等. 膜下滴灌水氮供应对甜菜氮素同化和利用的影响 [J]. 植物生理学报, 2019, 55 (6): 803-813.
- [20] GB/T 10496-2018, 糖料甜菜 [S].
- [21] 曲扬, 高妙真, 耿立清. 磷素水平对甜菜干物质积累与分配的影响 [J]. 中国甜菜糖业, 2002 (1): 11-13.
- [22] Tarkalson D D, Bjorneberg D L. Effect of phosphorus placement on sugarbeet production under strip tillage in south Idaho [J]. Crops & Soils, 2017, 50 (3): 48-55.
- [23] 曲文章, 张捷, 耿立清, 等. 磷与甜菜产量的形成研究之一 磷素水平对甜菜磷营养的影响 [J]. 中国甜菜糖业, 2001 (2): 1-3, 8.
- [24] 张云生, 李文先. 氮磷用量配比对甜菜块根产量及含糖量的

- 影响[J]. 新疆农业科学, 1997 (4): 166-167.
- [25] 高妙真, 曲扬. 甜菜高产高糖施肥标准的研究[J]. 中国甜菜糖业, 2000 (4): 1-4.
- [26] Tarkalson D D, Bjorneberg D L. Effect of phosphorus placement methods and rates on sugarbeet production under strip tillage in southern Idaho [J]. Crop Forage Turfgrass & Management, 2016, 2 (1): 1-8.
- [27] 刘蒙. 旱作甜菜密度与施肥优化栽培技术研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
- [28] 卢雪桦, 胡晓航, 郭金伟, 等. 基于品质和产量指数的糖用甜菜氮磷钾施肥模型研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35 (29): 63-69.
- [29] 杜永成. 氮磷钾肥施用量对甜菜光合能力和氮代谢酶的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- [30] 曲文章, 耿立清, 王红钢, 等. 磷素水平对甜菜生育及产量影响[J]. 中国甜菜糖业, 2002 (3): 7-9.
- [31] 范文婷. 氮磷钾肥施用量对黑龙江省不同生态区甜菜产质量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- [32] 郑毅, 李庆会, 范富, 等. 糖用甜菜氮磷钾配方施肥效益分析[J]. 中国土壤与肥料, 2016 (1): 77-82.
- [33] 任志山, 陈拴彪, 石海刚, 等. 氮磷钾不同配比对甜菜产质量的影响[J]. 中国糖料, 2003 (4): 23-25.
- [34] 黄春燕, 苏文斌, 樊福义, 等. 甜菜氮、磷、钾肥配合施用效应及推荐用量[J]. 中国糖料, 2011, 128 (2): 16-18.
- [35] 曹禹, 孙娜, 孙桂荣, 等. 氮·磷·钾肥对伊犁地区甜菜产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, 44 (31): 137-139.
- [36] 胡伟, 孙九胜, 周建朝, 等. 施肥对甜菜产量、含糖率及养分利用的影响[J]. 农学学报, 2015, 5 (9): 73-76.
- [37] 孙洪仁, 张吉萍, 吕玉才, 等. 中国北方甜菜土壤有效磷丰缺指标与适宜施磷量初步研究[J]. 中国糖料, 2019, 41 (1): 23-27.
- [38] 王静, 叶壮, 褚贵新. 水磷一体化对磷素有效性与磷肥利用率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23 (11): 1377-1383.

Effects of phosphorus application by drip irrigation on phosphorus uptake and phosphorus utilization efficiency of sugarbeet

WANG Juan¹, BAI Ru-xiao², CHEN Ying-hua¹, YANG Ke-ming¹, CUI Jian¹, WEI Chang-zhou^{1*} [1. College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi Xinjiang 832003; 2. Institute of Agricultural Science (Institute of Animal Science), The Ninth Division, Xinjiang Production and Construction Corps, Tacheng Xinjiang 834601]

Abstract: The field experiment was carried out using the main sugarbeet variety "Beta796" in Ta'er basin as experimental material, and the randomized block design was adopted. Four treatments of phosphorus (P_2O_5) application rates (P_0 : 0 $kg \cdot hm^{-2}$, P_1 : 120 $kg \cdot hm^{-2}$, P_2 : 180 $kg \cdot hm^{-2}$ and P_3 : 240 $kg \cdot hm^{-2}$) were set up under drip irrigation at the same rate of nitrogen and potassium. The absorption, accumulation and distribution of phosphorus nutrients in the main growth stages of sugarbeet were studied and the utilization efficiency of phosphorus nutrients in sugarbeet was analyzed to provide a theoretical basis for phosphate fertilizer management in the production of high yield, high quality and high efficiency of sugarbeet. The results showed that phosphorus application under drip irrigation increased the dry matter accumulation of sugarbeet, and compared with P_0 treatment, the dry matter accumulation of P_1 , P_2 and P_3 treatments increased by 16.6%, 24.7% and 27.9%, respectively, and there was no significant difference between P_2 and P_3 treatments. The Logistic equation of dry matter accumulation of sugarbeet showed that phosphorus application significantly increased the maximum dry matter accumulation rate and average dry matter accumulation rate of sugarbeet, up to 443.7 and 185.7 $kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$, respectively. The total phosphorus accumulation of sugarbeet increased with the increase of phosphorus application rate, which was beneficial to increase the phosphorus accumulation of sugarbeet in the later growth stage, especially in the underground part of sugarbeet. Compared with P_0 , P_1 and P_2 treatments, the underground phosphorus accumulation of P_3 treatment increased by 76.7%, 24.8% and 12.1%, respectively, at harvest time. Distribution proportion of sugarbeet phosphorus in aboveground and underground parts of different phosphorus application treatments had no significant difference. The results showed that the application of phosphorus in drip irrigation significantly increased the yield of sugarbeet, the sugar content of sugarbeet root and sugar yield. Compared with P_0 treatment, the root yield of P_1 , P_2 and P_3 treatments increased by 11.57%, 18.58% and 20.89%, respectively, and the sucrose content of sugar beet increased by 1.18%, 2.90% and 3.37%, respectively. The quality of sugar beet was hardly affected by phosphorus application. Phosphorus application increased the utilization rate of phosphate fertilizer, and the utilization rate of phosphate fertilizer in different treatments was 31.54% ~ 39.66%. P_2 treatment increased the agronomic utilization efficiency of phosphorus, and partial productivity of phosphorus decreased with the increase of phosphorus application rate. Considering the relative sugar yield, economic benefit and phosphorus utilization efficiency of sugarbeet, drip irrigation with phosphorus (P_2O_5) 85.1 ~ 187.4 $kg \cdot hm^{-2}$ can achieve the purpose of high yield and efficient utilization of phosphate fertilizer in sugarbeet.

Key words: sugarbeet; dry matter accumulation; phosphorus uptake; yield; phosphorus fertilizer utilization efficiency