

施氮量和密度互作对全覆膜旱作甜菜 光合特性和块根产量的影响

闫 威 李国龙 李 智 曹 阳 张少英

(内蒙古农业大学甜菜生理研究所, 010018, 内蒙古呼和浩特)

摘 要 全覆膜具有增温、保墒和压草的作用, 是干旱区农作物种植的有效措施。为探索旱作甜菜在全覆膜条件下的适宜施氮量和种植密度, 采用二因素裂区试验设计, 研究施氮量和密度不同组合处理对全覆膜旱作甜菜光合特性的影响, 为旱作甜菜高产栽培提供依据和参考。研究结果表明, 全覆膜条件下施氮水平和密度对旱作甜菜光合特性影响的互作效应显著; 适宜的施氮量和密度配置有利于甜菜 SPAD 值、叶面积指数、净光合速率 (P_n)、单株干物质积累量、根冠比以及块根产量的提高, SPAD 值、叶面积指数、 P_n 、单株干物质积累量均与产量呈正相关。在甜菜块根糖分增长期, SPAD 值和叶面积指数分别维持在 53.8 和 4.5 时, 旱作甜菜产量最大; 通过二项式回归分析建立密度和施氮量与产量的回归方程, 得出全覆膜旱作甜菜高产适宜的种植密度为 9.35 万株/hm², 施氮量为 128.8kg/hm²。

关键词 旱作; 甜菜; 全覆膜; 氮素密度互作; 光合特性; 产量

甜菜是我国重要的糖料作物之一, 具有耐旱、耐寒、耐盐碱的特性, 主要栽培于内蒙古、新疆和黑龙江等北方地区。近年来, 内蒙古甜菜种植面积大幅增加, 而干旱是内蒙古地区甜菜高产的瓶颈^[1-3]。全覆膜栽培技术是旱作农业重要的栽培措施, 已广泛应用于旱作玉米^[4-5]、冬小麦^[6]、马铃薯^[7]、棉花^[8]等作物。覆膜能优化作物部分生长形态指标, 并获得高产^[9-14]。施氮量和密度是影响作物产量形成的两个重要因素^[15-18]。邹序安等^[19]、张建军等^[20]及梁锦秀等^[21]研究表明, 在全覆膜条件下合理的施氮量有利于作物产量的增加。合理的密度有利于旱作马铃薯产量的提高^[21]。闫慧颖等^[22]和师日鹏等^[23]研究表明, 全覆膜条件下肥料和密度与作物的产量呈正相关。

对旱作甜菜高产栽培管理措施已有一些研究, 包括播前准备、播种技术、合理密植与施肥、地表覆盖及田间管理等措施^[24-25]。但是, 对于在旱作条件下, 通过全覆膜来提高甜菜产量的研究未见报道。因此, 本试验采用氮肥和密度二因素裂区试验设计, 比较不同处理对甜菜光合性能的影响, 探索全覆膜条件下旱作甜菜高产栽培适宜的种植密度及施

氮量。

1 材料与方法

1.1 试验地条件及供试材料

试验地在内蒙古凉城县旱作区 (北纬 40° 29' ~ 40° 32', 东经 112° 28' ~ 112° 30')。海拔 1 731.5m) 进行。整个生育期无灌溉条件, 2017 年甜菜生育期降雨量为 239.4mm。试验地前茬为黍子, 土壤为沙质土。0~20cm 耕层土壤 pH 为 8.73, 有机质含量 12.16g/kg, 全氮含量 0.625g/kg, 全磷含量 0.58g/kg, 全钾含量 17.79g/kg, 速效氮含量 57.97mg/kg, 有效磷含量 5.38mg/kg, 速效钾含量 164.2mg/kg。

供试甜菜品种为 KWS8138, 供试肥料为尿素 (N 含量 46%) 和甜菜专用肥 (N:P₂O₅:K₂O=4.8:7.2:6.0)。

1.2 试验设计

试验于 2017 年进行。试验采用裂区设计 (表 1)。主区设 3 个施氮量处理, 分别为纯氮 60、120、180kg/hm², 分别用 N1、N2、N3 表示; 副区设 3 个密度处理, 分别为 7.7 万、9.1 万、10.6 万株/hm², 分别用 D1、D2、D3 表示, 共 9 个处理。每个处理 6 次重复, 其中 3 个重复用于取样, 3 个重复用于测产。小区面积 20m² (4m×5m)。施甜菜专用肥 600kg/hm² (N:P₂O₅:K₂O=4.8:7.2:6.0), 施氮量不足的处理 (N2、N3) 用尿素补足, 每个小区磷、钾

作者简介: 闫威, 硕士研究生, 主要从事甜菜生理学研究

张少英为通信作者, 教授, 主要从事作物生理与分子生物学研究

基金项目: 现代农业产业技术体系 (CARS-170201)

收稿日期: 2018-11-16; 修回日期: 2019-04-15

表 1 甜菜密度和施氮量的裂区设计
Table 1 Split-plot design about planting density and nitrogen application rate in sugar beet

处理 Treatment	行距 Row spacing (cm)	株距 Plant spacing (cm)	种植密度 Planting density (万株/hm ²)	施氮量 Nitrogen application rate (kg/hm ²)
D1N1	50	26	7.7	60
D2N1	50	22	9.1	60
D3N1	50	18	10.6	60
D1N2	50	26	7.7	120
D2N2	50	22	9.1	120
D3N2	50	18	10.6	120
D1N3	50	26	7.7	180
D2N3	50	22	9.1	180
D3N3	50	18	10.6	180

肥施用量一致, 分别为 0.22、0.18kg。肥料以基肥的形式在纸筒甜菜移栽前一次性施入土壤, 田间管理同当地种植习惯。

1.3 指标测定与方法

在甜菜苗期(6月4日)、叶丛快速生长期(7月4日)、块根糖分增长期(8月4日)和糖分积累期(9月4日)4个生育时期进行形态指标和光合指标测定, 每次取样5株测定, 于10月4日进行测产。

用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 光合仪测定净光合速率(P_n)。用 SPAD-502 叶绿素仪测定甜菜倒3叶的 SPAD 值, 作为叶绿素含量指标。

按块根切削标准 GB/T 10496-2002 的规定测产^[26]。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2010 进行数据处理, 采用 SPSS 25.0

统计软件进行数据统计及方差分析。应用 Design Expert 软件计算理论最高产量。

2 结果与分析

2.1 施氮量、密度互作对全覆膜旱作甜菜叶面积指数的影响

叶面积指数(LAI)代表作物群体光合场所的大小。由表2可以看出, 在甜菜生长各生育时期不同施氮量、密度组合处理间 LAI 差异显著($P<0.05$)。后3个生育时期氮肥密度互作效应极显著($P<0.01$)。在甜菜后3个生育时期, 当施氮量较小时(N1~N2), 氮、密之间为正交互效应, 表现为协同促进; 其中在块根糖分增长期, 处理 D3N3 的 LAI 最大, 达到 5.05, 在相同密度条件下 N3 比 N1 增长 0.21~1.41, 在相同施氮量条件下 D3 比 D1 增长 -0.10~1.10。由此可见, 在块根糖分增长期高氮、

表 2 施氮量和密度对全覆膜旱作甜菜叶面积指数的影响
Table 2 Effects of nitrogen application rates and planting densities on LAI of sugar beet under full-film mulching in arid regions

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	叶丛快速生长期 Fast growth stage of leaf	块根糖分增长期 Sugar increasing stage of root	糖分积累期 Period of sugar accumulation
D1N1	0.17eD	1.51dE	3.74deC	3.48cdD
D2N1	0.24cdBCD	1.53dDE	3.87deC	3.52cCD
D3N1	0.29bcBC	1.62cC	3.64eC	3.40dDE
D1N2	0.22deCD	1.63cC	3.86deC	3.69abAB
D2N2	0.27bcdBC	1.74bB	4.51cB	3.77aA
D3N2	0.31bBC	1.97aA	4.95abA	3.28eE
D1N3	0.29bcBC	1.45eE	3.95dC	3.64bBC
D2N3	0.33bB	1.61cCD	4.78bAB	3.66bAB
D3N3	0.45aA	1.78bB	5.05aA	3.15fF
F 值 F-value	D	38.77**	132.47**	148.28**
	N	18.65**	330.10**	9.97*
	D × N	1.61	11.90**	18.94**

注: N—氮肥; D—种植密度。同列数据后不同大、小写字母分别表示处理间差异极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$), *, ** 分别表示在 5% 和 1% 水平处理间差异显著, 下同
Note: N—Fertilizer; D—Planting density. Values followed by different uppercase, lowercase letters in same column mean significant difference at 5%, 1% levels, respectively; *, ** represent 5%, 1% significant difference, respectively. The same below

高密度处理总体上有利于甜菜 LAI 的增大。由表 2 可以看出, 在甜菜叶丛快速生长期、块根糖分增长长期施氮量和密度对 LAI 的影响均较大。

2.2 施氮量、密度互作对全覆膜旱作甜菜 SPAD 值的影响

SPAD 值反映叶片叶绿素的相对含量, 受光强和氮素影响较大, 是分析植物光合能力和氮素营养的重要指标。由表 3 可以看出, 除 D1N2 处

理外, 不同生育期氮密处理的 SPAD 值差异显著 ($P<0.05$), 不同处理的 SPAD 值在 41.5~58.5。对甜菜全生育期的 SPAD 值进行方差分析, 结果表明: 整个生育时期除了高氮处理外, 其他处理均达到极显著水平 ($P<0.01$), 且氮肥和密度互作效应极显著 ($P<0.01$), 处理 D1N2 的 SPAD 值最高。当施氮量大于 N2 时, 氮、密之间为负交互作用, 表现为拮抗作用, 即在该施氮水平下, 密度处于

表 3 施氮量和密度对全覆膜旱作甜菜 SPAD 值的影响
Table 3 Effects of nitrogen application rates and planting densities on SPAD value of sugar beet under full-film mulching in arid regions

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	叶丛快速生长期 Fast growth stage of leaves	块根糖分增长期 Sugar increasing stage of root	糖分积累期 Period of sugar accumulation
D1N1	56.6bB	52.5cC	53.6bB	46.3eBC
D2N1	52.8dC	48.1eE	52.4cCD	45.3deCD
D3N1	46.8gE	42.8hH	47.9fF	41.5gF
D1N2	58.5aA	55.9aA	55.1aA	48.3aA
D2N2	55.5cB	53.8bB	53.8bB	47.2bAB
D3N2	51.7eC	50.7dD	52.7cBC	45.4dCD
D1N3	55.5cB	46.7fF	52.4cCD	45.5dCD
D2N3	52.0deC	44.8gG	51.4dD	44.5eDE
D3N3	49.4fD	45.1gG	50.0eE	43.5fE
F 值 F-value	D	486.64**	513.03**	140.08**
	N	157.63**	309.11**	159.70**
	D × N	12.82**	100.32**	17.59**

D1~D3 水平时, 甜菜处于施氮缓效或者无效状态。在本试验条件下, 密度 7.7 万株/hm²、施氮量 120kg/hm², 有利于提高甜菜叶片的 SPAD 值。

2.3 施氮量、密度互作对全覆膜旱作甜菜 P_n 的影响
光合速率表示植物体内合成物质能力的大小,

甜菜块根 90%~95% 的干物质都是通过光合作用转化而来, 光合速率的提高是甜菜获得高产的基础。由表 4 可知, 在甜菜生育期内不同处理 P_n 差异显著 ($P<0.05$), 在甜菜生育后期氮肥密度互作效应极显著 ($P<0.01$)。除苗期外, 其他生育时期, 当

表 4 施氮量和密度对全覆膜旱作甜菜 P_n 的影响
Table 4 Effects of nitrogen application rates and planting densities on P_n of sugar beet under full-film mulching in arid regions

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	叶丛快速生长期 Fast growth stage of leaves	块根糖分增长期 Sugar increasing stage of root	糖分积累期 Period of sugar accumulation
D1N1	27.5bB	21.6aAB	22.0bcBC	21.4cC
D2N1	24.1cdDE	19.3cC	21.3dCD	20.4dD
D3N1	22.3eE	17.8dD	19.3fE	19.6efDE
D1N2	29.4aA	21.9aA	24.0aA	24.6aA
D2N2	26.7bBC	20.6bBC	22.6bB	22.8bB
D3N2	25.0cCD	19.4cC	21.5cdC	20.1deD
D1N3	26.7bBC	17.9dD	22.7bB	21.6cC
D2N3	24.6cdD	16.6eDE	20.4eD	18.9fE
D3N3	23.7Dde	16.2eE	17.9gF	17.7gF
F 值 F-value	D	82.30**	61.47**	179.01**
	N	44.59**	43.77**	62.39**
	D × N	1.87	3.40*	9.75**

施氮量为 N1 和 N2 水平时, 氮、密之间为正交互作用, 当施氮量大于 N2 水平、密度为 D1~D3 水平时, 甜菜处于施氮缓效或低效状态, 即在该施氮条件下, 不利于甜菜 P_n 的提高。在块根糖分增长期, D1N2 处理的 P_n 最大, 在相同密度条件下 N2 比 N1 增长 $1.3\sim 2.2\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 在相同施氮量下 D1 比 D3 增长 $2.5\sim 4.8\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。由表 4 可知, 后 3 个生育时期两因素对旱作甜菜 P_n 影响顺序分别为密度>施氮量、密度>施氮量、施氮量>密度。

2.4 施氮量、密度互作对全覆膜旱作甜菜单株干物质积累与分配的影响

由表 5 可以看出, 在甜菜的各生育时期, 不同施氮量和密度组合处理单株干物质积累差异达极显著水平 ($P<0.01$), 后 3 个生育时期氮肥密度互作效应极显著 ($P<0.01$)。当施氮量较大时 (N2~N3), 氮、密之间为负交互效应。在糖分积累期, 相同密度条件下 N2 比 N1 增长 $16.99\sim 36.94\text{g}$, 在相同施氮量条件下 D3 比 D1 降低 $35.78\sim 53.78\text{g}$, 说明低密度和适量的氮肥有利于甜菜单株干物质

表 5 施氮量和密度对全覆膜旱作甜菜单株干物质积累量的影响
Table 5 Effects of nitrogen application rates and planting densities on dry matter accumulation per plant of sugar beet under full-film mulching in arid regions

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	叶丛快速生长期 Fast growth stage of leaves	块根糖分增长期 Sugar increasing stage of root	糖分积累期 Period of sugar accumulation
D1N1	0.94deD	40.76deCDE	153.55eC	239.19eC
D2N1	0.73fE	39.50fgEF	132.24fF	221.92eD
D3N1	0.64gE	38.88gF	114.69hH	185.41gF
D1N2	1.27bB	43.04bB	165.63bB	258.13bB
D2N2	0.97dCD	45.33aA	155.61cC	238.91cC
D3N2	0.86eD	41.50cdCD	138.02eE	222.35eD
D1N3	1.41aA	44.67aA	173.93aA	274.20aA
D2N3	1.08cC	42.10bcBC	147.19dD	236.44dD
D3N3	0.91deD	40.33efDEF	118.73gG	202.73fE
F 值 F-value	D	170.54**	1 428.61**	4 316.36**
	N	142.24**	2 025.21**	554.58**
	D × N	3.17	58.81**	472.02**

的积累。由表 5 可知, 甜菜除苗期外 3 个生育时期两因素对全覆膜旱作甜菜干物质积累量影响的顺序分别为施氮量>密度、施氮量>密度、密度>

施氮量。
根冠比 (T/R) 表示地上部与地下部器官物质分配的结果。由表 6 可以看出, 氮肥密度互作效应

表 6 施氮量和密度对全覆膜旱作甜菜根冠比 (干重) 的影响
Table 6 Effects of nitrogen application rates and planting densities on T/R (dry matter) of sugar beet under full-film mulching in arid regions

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	叶丛快速生长期 Fast growth stage of leaves	块根糖分增长期 Sugar increasing stage of root	糖分积累期 Period of sugar accumulation
D1N1	0.121cB	0.480bcBC	1.289bB	1.504eE
D2N1	0.112dC	0.458deCDE	1.189dD	1.425fF
D3N1	0.107eD	0.443efDE	1.160eDE	1.367gG
D1N2	0.131aA	0.508aA	1.396aA	1.894aA
D2N2	0.124bB	0.490bAB	1.235cC	1.744bB
D3N2	0.111dC	0.466cdCD	1.195dD	1.688cC
D1N3	0.112dC	0.494abAB	1.188dD	1.764bB
D2N3	0.101fE	0.441fE	1.156eDE	1.587dD
D3N3	0.093gF	0.419gF	1.126fE	1.452fEF
F 值 F-value	D	334.76**	164.85**	234.51**
	N	787.94**	236.04**	555.28**
	D × N	7.64**	17.76**	13.14**

达显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 水平。在甜菜各生育期, 施氮量相同时, 根冠比随密度的增大逐渐降低。相同密度条件下, 根冠比随施氮量的增加呈先升高后降低的趋势, 因为施氮量过多, 会造成叶丛徒长, 致使根冠比降低; 当施氮量大于 N2 水平时, 氮密交互与甜菜根冠比为负交互作用, 表现为拮抗作用。由表 6 可以看出, 除苗期外 3 个生育时期两因素对全覆膜旱作甜菜影响均为施氮量 > 密度。

2.5 施氮量和密度交互对全覆膜旱作甜菜块根产量的影响

由图 1 可以看出, 相同施氮量处理, 产量随密度的增加而先增加后降低, 9.1 万株/hm² 比 7.7 万株/hm² 处理增产 8.7%~11.8%, 其中, D3N1、D3N2、D3N3 分别比 D2N1、D2N2、D2N3 降低 3.2%、11.6%、7.3%。在相同密度条件下, N2 处理的产量均大于其他处理, 增产幅度为 8.10%~23.02%, 其中, 9.1 万株/hm² 时的 N2 处理产量最高, 与 D1N2、D3N2

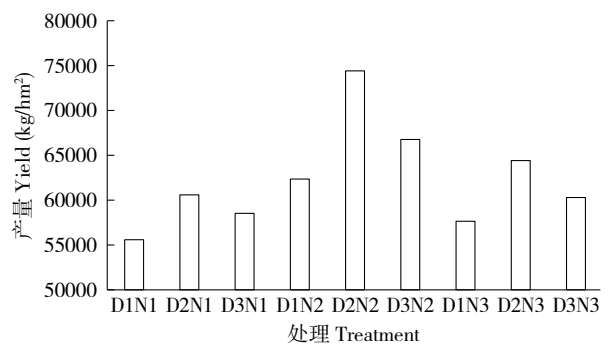


图 1 施氮量和密度对全覆膜旱作甜菜产量的影响
Fig.1 Effects of nitrogen application rate and planting densities on yield of sugar beet under full-film mulching in arid regions

相比分别增产 19.27% 和 11.59%。

通过二项式回归分析建立密度 (X_1) 和施氮量 (X_2) 与产量 (Y) 之间的回归方程: $Y=60536.8+57090.7X_1+592.4X_2-3053.4X_1^2-2.3X_2^2-1.8X_1X_2$, $R^2=0.860$ 。对上述方程进行 F 检验, $F=110.241$, 理论产量与方程预测值相关性显著, $R=0.927^*$, 表明氮肥、密度与产量之间回归关系显著^[27-28]。对各项回归系数进行显著性检验, 各 t 值结果: X_1 为 11.43, X_1^2 为 10.23, X_1X_2 为 3.12。旱作甜菜产量与密度、施氮量的方程中一次项均为正值, 二次项均为负值。当施氮量较小时 (N1 和 N2), 氮、密之间为正交互效应, 表现为协同促进作用; 当施氮量恒定时, 在一定范围内增加密度能有效增加作物产量, 甜菜处于施氮高效状态。当施氮量大于 N2 水平、种植密度处于 D1~D3 水平时, 甜菜处于施氮缓效或无效状态。其中施氮量为 120kg/hm²、密度为 9.1 万株/hm² 时, 甜菜产量达到最大值; 施氮量大于 120kg/hm² 时, 氮密之间呈现负交互效应, 可能是由于施氮量过高对作物产生毒害作用^[29]。利用软件 Design Expert, 根据二项式回归方程求出最高产量达 70 000kg/hm² 时, 种植密度为 9.35 万株/hm², 施氮量为 128.8kg/hm²。

2.6 施氮量和密度与全覆膜旱作甜菜光合指标及其与产量的相关性

对全覆膜旱作甜菜施氮量、密度与其光合指标进行相关性分析, 结果表明密度与叶面积指数呈极显著正相关关系; 施氮量与叶面积指数和单株干物质积累量呈极显著的正相关关系 (表 7), 表明不同施氮量和密度对全覆膜旱作甜菜的群体结构影响

表 7 全覆膜旱作甜菜施氮量 (N2) 和密度 (D2) 与光合指标和物质积累与分配的相关性 (块根糖分增长期)
Table 7 Correlation between nitrogen application rate (N2) and planting densities (D2), and photosynthetic indexes and accumulation and distribution of matter of sugar beet under full-film mulching in arid regions (the sugar increasing stage of root)

处理 Treatment	叶面积指数 LAI	SPAD 值 SPAD value	P_n	单株干物质积累量 Dry matter accumulation per plant	根冠比 Root/Shoot ratio	产量 Yield
密度 Planting density	0.935**	-0.995**	-0.990**	-0.996**	-0.954**	0.629*
施氮量 Nitrogen application rate	0.893**	0.324	0.361	0.667**	0.532*	0.678*

注: “*” 和 “**” 分别表示相关性达显著 ($P<0.05$) 和极显著 ($P<0.01$) 水平。下同
Note: “*” and “**” indicate significant correlation ($P<0.05$) and extremely significant correlation ($P<0.01$), respectively. The same below

极大。
对甜菜光合特性和产量进行相关性分析 (表 8), 结果表明 LAI 与产量呈极显著正相关关系; SPAD 值和 P_n 与根冠比呈极显著正相关; 根冠比与单株干物质积累量呈极显著正相关; 表明群体结构对全覆膜旱作甜菜的产量影响最大。

表 8 甜菜块根糖分增长长期光合特性与产量相关性
Table 8 Correlation between photosynthetic characteristics and yield during the sugar increasing stage of root

指标 Index	叶面积指数 LAI	SPAD 值 SPAD value	P_n	单株干物质积累量 Dry matter accumulation per plant	根冠比 Root/Shoot ratio	产量 Yield
叶面积指数 LAI	1					
SPAD 值 SPAD value	-0.018	1				
P_n	-0.231	0.940**	1			
单株干物质积累量 Dry matter accumulation per plant	-0.057	0.729*	0.779*	1		
根冠比 Root/Shoot ratio	0.075	0.875**	0.912**	0.823**	1	
产量 Yield	0.729**	0.292	0.186	0.091	0.318	1

3 讨论

氮肥和密度作为重要的栽培因素，与全覆膜作物的光合特性及产量有着紧密的联系。杜永成^[30]和范文婷^[31]研究表明，甜菜 LAI 随施氮量的增加呈逐步递增的趋势，适宜的施氮量有利于甜菜干物质的积累，从而促进产量的提高。白晓山^[32]指出，随着种植密度的增加，甜菜 LAI 呈逐渐升高的趋势。本研究结果表明，全覆膜条件下氮素供应和密度对旱作甜菜的光合特性有显著影响，且互作效应显著；在甜菜后 3 个生育时期，甜菜 LAI 和块根产量与氮、密互作效应极显著，当施氮量较小时（N1 和 N2），氮肥、密度之间为正交互效应，表现为协同促进作用，当施氮量恒定时，在一定范围内增加密度能有效增加 LAI 和甜菜产量，甜菜处于施氮高效状态，即高密度配合适量的施氮量有利于甜菜群体结构的形成以及块根产量的提高。从“源库”理论来看，地上部同化器官生长较为旺盛，为地下部块根的生长奠定了强大的“源”基础，提高作物群体光合生产能力即为增“源”，作物 LAI 的增加有利于“源”的积累，为后期作为“库”的块根快速生长提供保障，使甜菜块根干物质在适宜的条件下获得大幅度的增长，增加“源”的供应能力是高产的必要条件^[33]。本研究表明，在同一密度水平下，施氮量增加有利于甜菜地上部“源”的积累，即地上部呈增加趋势；此外，施氮量增加还有利于根冠比（地上部/地下部）增加，因此在增“源”的同时，作为“库”的块根也在迅速的生长，这样源库的变化规律有利于甜菜高产的形成。

4 结论

本试验条件下，全生育期甜菜的 LAI、SPAD 值及 P_n 在块根糖分增长长期达到最大值，不同处理

间的变化幅度分别在 3.64~5.05、47.9~55.1、17.9~24.0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ，其中高密度适宜的施氮量有利于甜菜 LAI 的提高，低密度和适量的氮肥有利于 SPAD 值及 P_n 的提高。全覆膜旱作甜菜高产适宜的种植密度为 9.35 万株/hm²，施氮量为 128.8kg/hm²。

参考文献

[1]刘蒙. 旱作甜菜密度与施肥优化栽培技术研究. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2015.

[2]李阳阳, 费聪, 崔静, 等. 滴灌甜菜对糖分积累期水分亏缺的生理响应. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 373-380.

[3]王瑗, 盛连喜, 李科, 等. 中国水资源现状分析与可持续发展对策研究. 水资源与水工程学报, 2008(3): 10-14.

[4]唐小明, 李尚中, 樊廷录, 等. 不同覆膜方式对旱地玉米生长发育和产量的影响. 玉米科学, 2011, 19(4): 103-107.

[5]李尚中, 王勇, 樊廷录, 等. 旱地玉米不同覆膜方式的水温及增产效应. 中国农业科学, 2010, 43(5): 922-931.

[6]杨长刚, 柴守玺, 常磊, 等. 不同覆膜方式对旱作冬小麦耗水特性及籽粒产量的影响. 中国农业科学, 2015, 48(4): 661-671.

[7]何进勤, 雷金银, 冒辛, 等. 马铃薯覆膜方式对土壤氮磷钾养分与产量的影响. 中国土壤与肥料, 2017(2): 35-41.

[8]苏欣, 缴锡云, 翟铎, 等. 黑龙江流域不同栽培方式下棉花蒸发量及产量试验研究. 节水灌溉, 2012(5): 47-49.

[9]张瑞喜, 史吉刚, 宋日权, 等. 覆膜滴灌对玉米生长及苗期土壤温度的试验研究. 节水灌溉, 2016(9): 98-101.

[10]侯慧芝, 吕军峰, 郭天文, 等. 全膜覆土栽培对作物的水温效应. 麦类作物学报, 2012, 32(6): 1111-1117.

[11]王俊, 李凤民, 宋秋华, 等. 地膜覆盖对土壤水温和春小麦产量形成的影响. 应用生态学报, 2003(2): 205-210.

[12]李世清, 李东方, 李凤民, 等. 半干旱农田生态系统地膜覆盖的土壤生态效应. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003(5): 21-29.

[13]Xue N W, Xue J F, Yang Z P, et al. Effects of film mulching regime on soil water status and grain yield of rain-fed winter wheat on the Loess Plateau of China. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(11): 2612-2622.

[14]Gao Y H, Xie Y P, Jiang H Y, et al. Soil water status and root distribution across the rooting zone in maize with plastic film mulching. Field Crops Research, 2014, 156: 40-47.

[15]巨晓棠. 氮肥有效率的含义及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区. 土壤学报, 2014, 51(5): 921-933.

[16]Sotiropoulou D E, Karamanos A J. Field studies of nitrogen application on growth and yield of Greek oregano (*Origanum vulgare* ssp. *hirtum* (Link) Ietswaart). Industrial Crops & Products, 2010,

- 32(3):450–457.
- [17]杨罗锦,陶洪斌,王璞. 种植密度对不同株型玉米生长及根系形态特征的影响. 应用与环境生物学报,2012,18(6):1009–1013.
- [18]王秀斌,徐新朋,孙刚,等. 氮肥用量对双季稻产量和氮肥利用率的影响. 植物营养与肥料学报,2013,19(6):1279–1286.
- [19]邹序安,远红伟,陆引罡. 肥料运筹和覆膜对小麦营养特征及产量品质的影响. 西北农业学报,2009,18(2):70–73,87.
- [20]张建军,樊廷录,党翼,等. 密度与氮肥运筹对陇东旱塬全膜双垄沟播春玉米产量及生理指标的影响. 中国农业科学,2015,48(22):4574–4584.
- [21]梁锦秀,郭鑫年,张国辉,等. 覆膜和密度对宁南旱地马铃薯产量及水分利用效率的影响. 水土保持研究,2015,22(5):266–270.
- [22]闫慧颖,李春喜,叶培麟,等. 种植密度和施肥水平对青海旱地覆膜种植甜高粱草产量及品质的影响. 草业科学,2017,34(12):2512–2520.
- [23]师日鹏,上官宇先,马巧荣,等. 密度与氮肥配合对垄沟覆膜栽培冬小麦干物质累积及产量的影响. 植物营养与肥料学报,2011,17(4):823–830.
- [24]范志廷. 辽西北半干旱区旱作甜菜关键栽培技术集成. 现代农业,2013(1):44.
- [25]王树林,张瑞枝,李洁,等. 发展旱作甜菜生产. 中国甜菜糖业,2001(4):44–49.
- [26]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 10496–2002 糖料甜菜,2002.
- [27]田丰,张永成,张凤军,等. 不同肥料和密度对马铃薯光合特性和产量的影响. 西北农业学报,2010,19(6):95–98.
- [28]邓中华,明日,李小坤,等. 不同密度和氮肥用量对水稻产量、构成因子及氮肥利用率的影响. 土壤,2015,47(1):20–25.
- [29]孙云岭,杨树青,刘德平,等. 水肥互作对大豆产量及氮肥利用的影响. 灌溉排水学报,2018,37(10):81–86.
- [30]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. 哈尔滨:东北农业大学,2012.
- [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. 哈尔滨:东北农业大学,2012.
- [32]白晓山. 不同种植方式、密度和施肥量对甜菜产量及含糖率的影响. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2014.
- [33]余少波,王志刚,高聚林,等. 玉米单交种光合生产能力杂种优势对氮肥的响应. 玉米科学,2016,24(5):26–32.

Effects of Nitrogen Application Rate and Planting Density Interaction on Photosynthetic Characteristics and Root Yield of Sugar Beet under Full-Film Mulching in Arid Regions

Yan Wei, Li Guolong, Li Zhi, Cao Yang, Zhang Shaoying

(Sugar Beet Physiological Institute, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China)

Abstract Full-film mulching has the advantages of increasing temperature, preserving moisture and suppressing grass, and it is an effective measure for dryland farming. Herein, a two-factor split-plot design was used to explore suitable nitrogen application and planting densities of sugar beet under full-film conditions in arid regions. Comparative study on photosynthetic characteristics and yields under full-film mulching condition through different combinations of nitrogen application rates and planting densities showed that nitrogen supply and planting density had significant effects on photosynthetic characteristics of sugar beet under full-film conditions under dry conditions. The suitable nitrogen and density were beneficial to SPAD value, LAI (leaf area index), net photosynthetic rate (P_n), the accumulation of dry matter per plant, T/R, and yields of beet. In addition, SPAD value, LAI, P_n , T/R, and dry matter accumulation per plant were positively correlated with yields. During the increasing stage of sugar beet root, the maximum yields could be obtained when the SPAD value and LAI of sugar beet were controlled at 53.8 and 4.5, respectively. The regression equation of density (X_1) and nitrogen application (X_2) with yields (Y) was obtained by binomial regression analysis. The maximum yields of sugar beets could be obtained when the density was 93 500 plant/hm² and the nitrogen application rate was 128.8kg/hm².

Key words Dry farming; Sugar beet; Full-film mulching; Interaction of nitrogen fertilizer and planting density; Photosynthetic characteristics; Yield