

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.04100

密度和施肥对旱地马铃薯干物质积累、产量和水肥利用的影响

柳燕兰¹ 郭贤仕^{1,*} 张绪成^{1,*} 马明生¹ 王宏康²

¹ 甘肃省农业科学院旱地农业研究所 / 甘肃省旱作区水资源高效利用重点实验室, 甘肃兰州 730070; ² 甘肃省种子总站, 甘肃兰州 730000

摘要: 协同提高产量和资源利用效率, 是旱作马铃薯高产高效的基础。本研究以陇薯 10 号为材料, 于 2017—2019 年进行大田试验, 设置当地农民习惯栽培(CK)、高产高效栽培(YE)和超高产栽培(HY) 3 种栽培模式, 测定旱地马铃薯叶面积指数(LAI)、叶片 SPAD 值、冠层光合能力、干物质积累转运、块茎产量、水肥利用效率等指标。结果表明, 与 CK 相比, YE 和 HY 均提高了马铃薯 LAI 和叶片 SPAD 值, YE 在降雨较少的 2017 年增幅更明显; 二者均减慢了马铃薯块茎膨大后的 LAI 和叶片 SPAD 降低幅度, 使其冠层光合能力在块茎膨大期和淀粉积累期 2 年平均提高 29.9%、34.7%和 40.2%、50.5%。基于较高的 LAI 和冠层光合能力, YE 和 HY 的地上干物质在块茎膨大期较 CK 3 年平均增加 123.05%和 118.53%; 同时块茎膨大后同化物对块茎的贡献率增加 22.56%和 19.29%, 使马铃薯产量在 2017—2019 年平均增加 47.93%和 47.78%, 水分利用效率平均增加 77.59%和 75.85%, 均达到显著差异水平。YE 和 HY 使马铃薯商品薯产量显著增加, 收益显著提高, 在 2017—2019 年分别较 CK 新增纯收益 7330.3 元 hm^{-2} 和 6024.6 元 hm^{-2} 。较大的群体冠层和较高的物质生产促进了植株对 N、P、K 的积累, YE 的 N、P 利用效率较 CK 分别提高 15.21%和 17.20%, N、K 收获指数分别提高 3.85%和 7.79%; HY 的 N 利用效率提高 12.37%。YE 的 WUE、N 和 P 利用效率较 HY 提高 2.05%、2.53%和 23.41%, 新增纯收益 1305.7 元 hm^{-2} 。因此, YE 减施缓释尿素 40%并有机替代、密度 60,000 株 hm^{-2} , 能够提高水分和养分利用效率, 维持马铃薯花后较高的冠层光合能力, 促进茎叶干物质向块茎转运, 实现作物增产和资源高效利用协同发展, 是半干旱区黑膜覆盖马铃薯种植推荐的高产高效模式。

关键词: 马铃薯; 栽培模式; 冠层光合能力; 干物质积累与转运; 产量; 水肥利用效率

Effects of planting density and fertilization on dry matter accumulation, yield and water-fertilizer utilization of dryland potato

LIU Yan-Lan¹, GUO Xian-Shi^{1,*}, ZHANG Xu-Cheng^{1,*}, MA Ming-Sheng¹, and WANG Hong-Kang²

¹ Institute of Dryland Farming, Gansu Academy of Agricultural Sciences / Gansu Province Key Laboratory of Effective Utilization of Water Resource on Dryland, Lanzhou 730070, Gansu, China; ² Gansu Seed General Station, Lanzhou 730000, Gansu, China

Abstract: It is important to increase potato production and the natural resource utilization efficiency in dryland farming system. A field experiment was conducted using Longshu 10 with three planting modes from 2017 to 2019, including farmer mode (CK), the mode with high yield and efficiency (YE), and higher yield mode (HY). The leaf area index (LAI), SPAD, photosynthetic rate, accumulation and remobilization of dry matter, water use efficiency (WUE) and fertilizer use efficiency (FUE) was investigated. The results showed that LAI and SPAD were increased in YE and HY compared to CK, and it was more significant in 2017 when there was less rainfall. Meanwhile, less reduction in LAI and SPAD after tubers enlargement resulted in an increase of canopy photosynthetic rate by 29.9%, 34.7% (in 2018 and 2019), and 40.2%, 50.5% (in 2018 and 2019) during the expanding stage and starch accumulation stage, respectively. Average aboveground dry matter in YE and HY was higher than CK by 123.1% and

本研究由甘肃省农业科学院重点研发计划项目(2019GAAS25)和国家科技支撑计划项目(2015BAD22B01-05)资助。

This study was supported by the Key Research and Development Program of Gansu Academy of Agricultural Sciences (2019GAAS25) and the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2015BAD22B01-05).

* 通信作者(Corresponding authors): 郭贤仕, E-mail: guoxsh@21cn.com, Tel: 0931-7612800; 张绪成, E-mail: gszhangxuch@163.com, Tel: 0931-7614864

第一作者联系方式: E-mail: liuyanlan868@163.com

Received (收稿日期): 2020-05-01; Accepted (接受日期): 2020-08-19; Published online (网络出版日期): 2020-09-02.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200902.0928.004.html>

118.5% in the enlargement stage due to higher LAI and photosynthetic rate. The contribution rate of assimilation after potato tuber enlargement in YE and HE was higher than CK by 22.56% and 19.29%, resulting in an average potato production increase of 47.93% and 47.78%, and average water use efficiency increased by 77.59% and 75.85%, respectively. YE and HY advantaged in tuber production and income improvement. Compared with CK, the net income increased by 7330.3 Yuan hm^{-2} and 6024.6 Yuan hm^{-2} in 2017 to 2019, respectively. The accumulation of N, P, and K was significantly enhanced due to large population canopy and high plant biomass accumulation. Compared to CK, N and P use efficiency, and the harvest index of N and P was increased under YE mode by 15.21%, 17.20% and 3.85%, 7.79%, respectively, and the N use efficiency was increased by 12.37% under HY mode. WUE, N, and P use efficiency of YE mode was higher than HY by 2.05%, 2.53%, and 23.41%, respectively, and the net income increased by 1305.7 Yuan hm^{-2} . Therefore, replacement of slow-release urea with organic manure by 40% and improvement of planting density with 60,000 plants hm^{-2} in YE mode potentially increased in water use efficiency, nutrient use efficiency, high canopy photosynthetic rate maintenances, and remobilization of dry matter from stem and leaf to tubers. In conclusion, YE as a high tuber production and resource use efficiency planting mode, is recommended in semi-arid areas with black-film mulched potato cultivation regime.

Keywords: potato; cultivation pattern; canopy photosynthetic capacity; dry matter accumulation and transportation; yield; water-fertilization use efficiency

甘肃省是我国马铃薯优势主产区, 但单产长期徘徊在 20 t hm^{-2} 左右^[1-2], 仅实现了当地光潜力的 14.49%, 热潜力的 40.40%, 降水潜力的 78.43% 和土壤肥力潜力的 93%^[3]。究其原因, 主要是甘肃省 70% 以上的马铃薯种植在年降水量 350 mm 左右的雨养农业区^[4], 裸地稀植、花前培土的种植和肥料供应与作物需肥错位等限制了对区域光、热、降水及肥力资源的充分利用, 使马铃薯的产量和水肥利用较低。如何系统优化种植模式、密度及施肥等农艺栽培管理措施, 来充分挖掘马铃薯的光、热、水、肥及产量生产潜力是实现该区马铃薯高产高效的关键, 对保证区域马铃薯生产可持续发展及保障国家粮食安全具有重要的意义。

黑色地膜覆盖是陇中半干旱区近年来马铃薯主要的种植模式, 能够抑蒸保墒、协调马铃薯需水和马铃薯耗水之间的矛盾, 使产量和水分利用效率得到大幅度提高^[5]。通过优化农艺栽培管理措施来提升马铃薯光、热及水、肥资源利用, 可能是协同实现高产高效的有效途径。有研究表明, 合理增加种植密度可提高群体数量和叶面积指数, 通过影响群体光合性能和土壤水肥利用来增加产量^[6-7]; 合理密植既能保持植株较高的氮积累量, 又使氮转运率不至于过高, 避免生育后期叶片的早衰, 协同提高产量和氮肥利用率^[8-9]。肥料效应可通过提高个体光合速率影响群体光合性能, 在产量形成的关键生育期对密度效应进行补偿^[6], 优化施肥后可提高氮肥利用效率的同时增加产量^[10]。过量普通氮肥全部基施会使作物前期养分过剩而降低群体冠层光合速率和作物生长^[11]、影响同化物的转运^[12], 降低产量和肥料利用。通过缓释尿素替代普通尿素, 可利用缓释

肥肥效释放缓慢的特点弥补马铃薯生育后期对氮的需求^[13], 一次性基施较普通尿素能提高马铃薯产量的 6.4%^[14]; 在玉米上可通过提高生育后期干物质生产量及分配比例来提高产量^[15], 且氮肥利用率提高 6.2%~86.6%^[16]。目前在小麦^[17]和玉米^[18-19]上通过增加密度、肥料运筹、种植方式等多项栽培技术的集成优化或者综合农艺措施, 均显著提高产量和资源利用效率。但是, 针对半干旱区马铃薯, 多种技术组合(覆盖、密度和施肥)对冠层光合同化、干物质转运、产量形成及其水肥利用的调控效应尚不清楚。为此, 本文在广泛调研西北半干旱区马铃薯当前农户习惯种植方式的基础上, 通过对黑色地膜覆盖、增加种植密度及肥料配施等多项栽培技术集成优化模式, 研究不同栽培模式对马铃薯叶面积指数、叶片 SPAD 值、冠层光合能力、干物质积累与转运以及产量和水肥利用的影响, 明确不同栽培模式下旱地马铃薯增产增效的机制, 以期为旱地马铃薯高产高效栽培提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2017—2019 年在甘肃省农业科学院定西试验站(甘肃省定西市安定区团结镇唐家堡村, $104^{\circ}36'E$, $35^{\circ}35'N$)进行。该区海拔 1970 m, 年平均气温 6.2°C , 年辐射总量 5898 MJ m^{-2} , 年日照时数 2500 h, 10°C 积温 $20,755.1^{\circ}\text{C}$, 无霜期 140 d, 属中温带半干旱气候。作物一年一熟, 为典型旱地雨养农业区。年均降水量 415 mm, 6 月至 9 月降水量占年降水量的 68%, 降水相对变率为 24%, 400 mm 降水保证率为 48%。试验区土壤为黄绵土, 耕层 0~20 cm

含有机质 11.99 g kg^{-1} 、全氮 1.16 g kg^{-1} 、全磷 0.73 g kg^{-1} 、全钾 17.28 g kg^{-1} 、速效磷 8.67 mg kg^{-1} 、速效钾 $121.50 \text{ mg kg}^{-1}$ ，pH 8.35。

1.2 试验设计

试验共设当地农户栽培(CK)、高产高效栽培(YE)、超高产栽培(HY) 3 种栽培模式。采用随机区组排列, 3 次重复, 小区面积为 49.5 m^2 。YE 和 HY 模式的马铃薯均采用全膜覆盖垄沟种植, 种植带宽 100 cm , 宽窄行种植, 宽行 60 cm , 窄行 40 cm (图 1), 沟内每隔 50 cm 左右扎眼以便于水分入渗。其中, YE 模式的行距 50 cm , 株距 33 cm , 播种密度 $60,000 \text{ 株 hm}^{-2}$; HY 模式的行距 50 cm , 株距 30 cm , 播种

密度 $67,500 \text{ 株 hm}^{-2}$; CK 采用露地平作种植, 行距 50 cm , 株距 44 cm , 播种密度 $45,000 \text{ 株 hm}^{-2}$ 。CK 模式的氮为普通尿素(含 N 46%); YE 和 HY 模式的氮为缓释尿素(山东众德集团生产, 氮 45%, 初期养分释放 10%); 所有处理的磷、钾肥分别为过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)、氯化钾(含 K_2O 60%), 有机肥为腐熟的羊粪(全氮 0.5%, 全磷 0.4%, 全钾 0.4%), 肥料全部一次性基施。试验具体的种植模式、密度及肥料用量见表 1。供试品种为陇薯 10 号, 2017 年 4 月 20 日播种, 10 月 16 日收获; 2018 年 4 月 22 日播种, 10 月 9 日收获; 2019 年 4 月 22 日播种, 9 月 27 日收获。其他管理同大田。

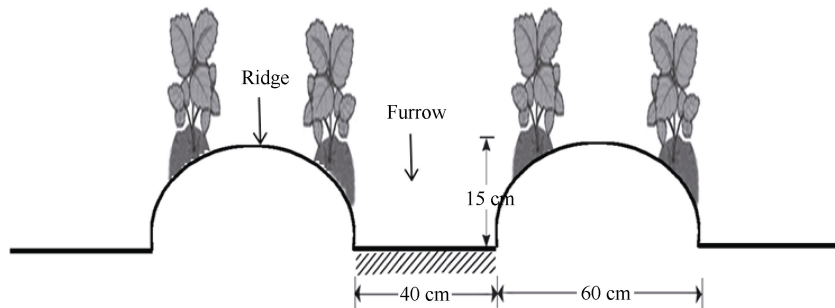


图 1 全膜覆盖垄沟种植马铃薯示意图

Fig. 1 Schematic diagram of potato planting in ridges and furrows with plastic mulching

表 1 不同栽培模式的种植密度和肥料用量

Table 1 Plant density and fertilizer application under different cultivation and management patterns

栽培模式 Cultivation pattern	缩写 Abbreviations	覆盖方式 Coverage style	密度 Density (plant hm^{-2})	肥料种类及用量 Fertilizer type and dosage (kg hm^{-2})			
				N	P_2O_5	K_2O	羊粪 Sheep manure
农户栽培 Farmer mode cultivation	CK	露地平作 Flat planting without plastic mulching	45,000	120	75	0	0
高产高效栽培 High yield and efficiency cultivation	YE	全膜覆盖垄沟种植 Ridge-furrow planting with plastic mulching	60,000	150	90	120	45,000
超高产栽培 Higher yield cultivation	HY	全膜覆盖垄沟种植 Ridge-furrow planting with plastic mulching	67,500	210	120	150	45,000

1.3 试验区 2017—2019 年降雨量及平均气温

根据甘肃省农业科学院定西试验站气象资料统计, 2017 年试验区马铃薯全生育期降水 354.8 mm ; $>10 \text{ mm}$ 降水 15 次, 为 215 mm , $<10 \text{ mm}$ 的降水 42 次, 为 139.8 mm 。2018 年马铃薯全生育期降水 425.4 mm ; $>10 \text{ mm}$ 降水 15 次, 为 265.3 mm , $<10 \text{ mm}$ 的降水 54 次, 为 160.1 mm 。2019 年马铃薯全生育期降水 420.7 mm ; $>10 \text{ mm}$ 降水 11 次, 为 244.7 mm , <10

mm 的降水 47 次, 为 176.0 mm 。3 年均均在马铃薯花期发生持续性干旱, 季节分配不均(图 2), 对马铃薯的生长造成不利影响, 导致年际间产量不一致。2017 年马铃薯生育期内最低温 1.1 , 最高温 25.1 , 平均气温 15.25 ; 2018 年马铃薯生育期内最低温 7.1 , 最高温 21.7 , 平均气温 15.81 ; 2019 年马铃薯生育期内最低温 6.2 , 最高温 21.7 , 平均气温 15.43 。

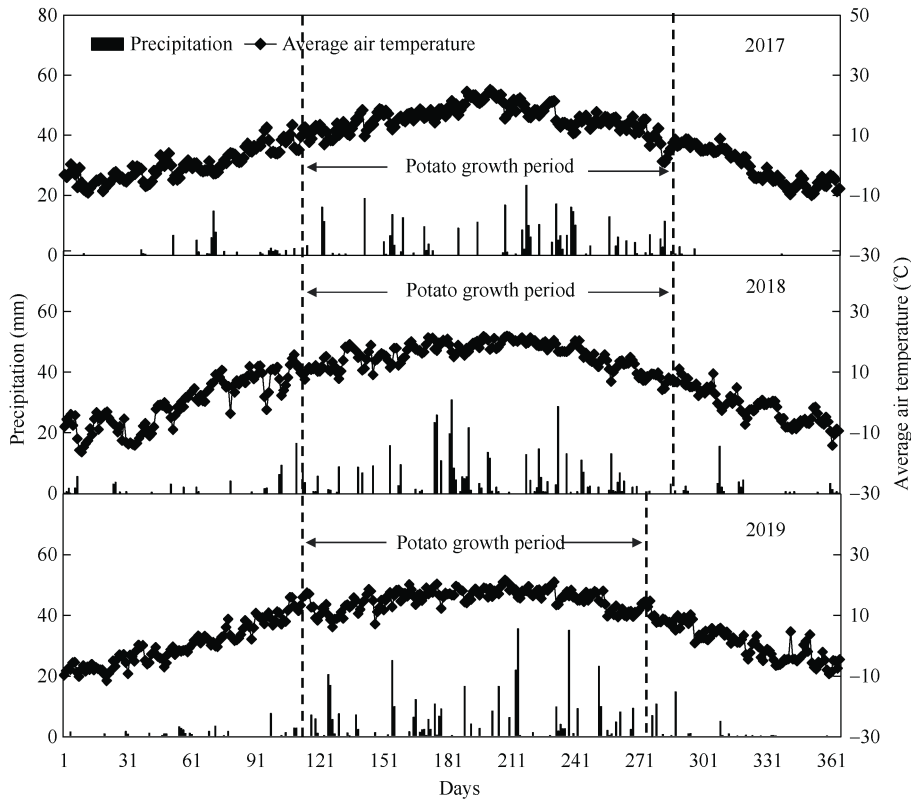


图 2 2017–2019 年试验区降水(P)和平均气温(T)变化

Fig. 2 Changes of precipitation(P) and average air temperature(T) in experimental area from 2017 to 2019

1.4 测定指标及方法

1.4.1 SPAD 和 LAI 在马铃薯蕾期、花期、块茎膨大期、淀粉积累期, 用 SPAD-502 plus 叶绿素仪测定叶片 SPAD 值, 选择倒二枝的顶叶为测定对象, 每个叶片避开叶脉自上而下测定 5 次, 每个小区选择 10 个叶片。在马铃薯蕾期、花期、块茎膨大期、淀粉积累期, 用 CI-110 植物冠层分析仪(CID, 美国)测定叶面积指数(leaf area index, LAI), 每小区重复测定 5 次, 取其平均值作为小区 LAI。

1.4.2 光合速率 分别在块茎膨大期和淀粉积累期, 用 LI-6400 型便携式光合测定系统在 10:00—12:00 测定光合速率(P_n , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 每次测定 10 株, 取其平均值。冠层光合能力用群体 LAI 与单株净光合速率的乘积表示^[20]。

1.4.3 生物量和产量 分别于马铃薯蕾期、花期、块茎膨大期、淀粉积累期和成熟期在各小区中选取长势均匀一致的 5 株, 先将植株用水冲洗, 滤纸吸干后, 将植株按照根、茎、叶、块茎分开, 105 杀青 30 min 后 80 烘干至恒重, 测定各器官干物重, 粉碎过筛后保存, 用于植株氮、磷、钾养分分析。马铃薯成熟期每小区按实际块茎鲜重计算产量。

1.4.4 耗水量和水分利用效率 在马铃薯播期和收获后, 用烘干法测定 0~200 cm 土层的土壤含水量, 每 20 cm 为 1 个层次, 每小区在垄上马铃薯株间测定 1 个位点。土壤贮水量计算公式: $SWS(\text{mm}) = WS \times \gamma \times d / 100$ 。式中 WS 为土壤质量含水量(g kg^{-1}); γ 为土壤容重(g cm^{-3}); d 为土层深度(cm)。土壤耗水量的计算公式: $ET = SWS_{BF} - SWS_{HA} + P$, 式中 SWS_{BF} 为播期土壤贮水量, SWS_{HA} 为收获后土壤贮水量, P 为马铃薯全生育期降雨量。水分利用效率(WUE) = Y_d / ET ^[21], 式中 Y_d 为马铃薯单位面积产量(kg hm^{-2}), ET 为马铃薯全生育期耗水量。

1.4.5 植株 N、P、K 含量的测定 将准备好的成熟期的植株样品用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮法制备待测液, 采用凯氏定氮法测定全氮含量, 钒钼黄比色法测定全磷含量, 火焰光度法测定全钾含量^[22]。

1.5 相关参数计算

氮、磷、钾的相关指标计算方法参照王永华等^[23]

(1) 植株氮(磷、钾)素总积累量(kg hm^{-2}) = \sum 植株各个器官干重 \times 氮(磷、钾)含量;

(2) 氮(磷、钾)素利用效率(kg kg^{-1}) = 块茎产量 / 植株氮(磷、钾)素总积累量;

(3) 氮(磷、钾)素收获指数=块茎氮(磷、钾)素积累量/成熟期植株氮(磷、钾)素总积累量。

干物质转运的相关指标计算方法参照刘星等^[24], 稍作改进。

(1) 块茎膨大期前营养器官贮藏干物质转运量 (kg hm^{-2})=块茎膨大期植株干重-成熟期植株干重;

(2) 块茎膨大期前营养器官贮藏干物质转运率 (%)=(块茎膨大期植株干重-成熟期植株干重)/块茎膨大期植株干重 $\times 100\%$;

(3) 块茎膨大期后光合同化量(输入块茎部分) (kg hm^{-2})=成熟期块茎干重-块茎膨大期前营养器官贮藏干物质转运量-块茎膨大期块茎干重;

(4) 块茎膨大期后光合同化量对块茎的贡献率 (%)=块茎膨大期后光合同化量/(成熟期块茎干重-块茎膨大期块茎干重) $\times 100\%$ 。

1.6 数据处理与统计分析

用 Microsoft Excel 2010 软件作图, DPS 对数据进行 ANOVA 方差分析, 并用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同栽培模式对旱地马铃薯 LAI 的影响

马铃薯的 LAI 随生育进程呈先增加后降低趋势, 均在块茎膨大期达最大值; YE 和 HY 在整个生育期的 LAI 均显著高于 CK, 不同生育期处理间表现不同(表 2)。2017 年在现蕾期和淀粉积累期处理间差异显著, YE 和 HY 较 CK 分别增加 42.3%、60.5%和 35.5%、30.8%; 在淀粉积累期 YE 较 HY 增加 3.43%。在花期和块茎膨大期, YE 和 HY 间差异不显著, 但均显著高于 CK, 分别增加 57.5%、67.3%和 21.3%、19.7%。2018 和 2019 年 YE 和 HY 的 LAI 在 4 个生育期无显著差异, 但均显著高于 CK。与块茎膨大期相比, CK 淀粉积累期的 LAI 在 2017—2019 年分别降低 25.3%、22.3%、19.9%; YE 的分别降低 12.2%、10.3%、11.9%; HY 的分别降低 14.7%、10.5%、9.5%。表明 YE 和 HY 的马铃薯生育后期 LAI 下降幅度小于 CK, YE 下降幅度更小, 这为光热资源的利用奠定了基础。

表 2 不同栽培模式下马铃薯叶面积指数

Table 2 Leaf area index (LAI) of potato under different cultivation models

年份 Year	处理 Treatment	现蕾期 Squaring stage	花期 Flowering stage	块茎膨大期 Tuber expanding stage	淀粉积累期 Starching accumulation stage
2017	CK	1.27±0.09 c	1.53±0.18 b	3.07±0.16 b	2.45±0.10 c
	YE	1.80±0.20 b	2.41±0.16 a	3.73±0.16 a	3.32±0.17 a
	HY	2.03±0.17 a	2.56±0.17 a	3.68±0.13 a	3.21±0.15 b
2018	CK	1.83±0.18 b	2.83±0.18 b	3.32±0.16 b	2.71±0.21 b
	YE	2.49±0.21 a	3.68±0.25 a	4.14±0.12 a	3.75±0.16 a
	HY	2.65±0.29 a	3.73±0.18 a	4.28±0.14 a	3.88±0.16 a
2019	CK	2.22±0.16 b	2.37±0.13 b	3.38±0.17 b	2.82±0.31 b
	YE	2.73±0.13 a	3.11±0.16 a	4.27±0.20 a	3.82±0.28 a
	HY	2.83±0.24 a	3.23±0.17 a	4.32±0.16 a	3.95±0.22 a

不同小写字母表示在同一年份同一生育期不同处理间在 0.05 水平上差异显著。处理同表 1。

Values followed by different lowercase letters in the same growth stage and the same year are significantly different among treatments at the 0.05 probability level. Treatments are the same as those given in Table 1.

2.2 不同栽培模式下旱地马铃薯叶片 SPAD 值的变化

马铃薯叶片 SPAD 值随生育进程呈先增加后降低趋势, 峰值出现在块茎膨大期(表 3)。苗期, 处理间 SPAD 值 3 年均无显著差异。现蕾期、花期、块茎膨大期和淀粉积累期, YE 和 HY 间差异不显著, 均高于 CK。2017 年分别显著增加 3.5~6.5 和 3.7~4.9; 2018 年分别增加 3.2~7.9 和 4.3~7.4;

2019 年分别增加 3.8~7.7 和 4.2~8.0。与块茎膨大期相比, 淀粉积累期 CK 的 SPAD 值在 2017—2019 年分别降低 8.62、9.41、10.04; YE 的 SPAD 值分别降低 6.30、5.99、8.97; HY 的 SPAD 值分别降低 7.46、6.46、10.49。表明 YE 和 HY 的马铃薯生育后期 SPAD 值降低幅度小于 CK, 且 YE 下降幅度更小; 维持较高的 SPAD 值, 可延长光合功能期, 为块茎的膨大提供较充足的光合同化物。

表 3 不同栽培模式下马铃薯叶片 SPAD

Table 3 SPAD of potato under different cultivation models

年份 Year	处理 Treatment	苗期 Seedling stage	现蕾期 Squaring stage	花期 Flowering stage	块茎膨大期 Tuber expanding stage	淀粉积累期 Starching accumulation stage
2017	CK	50.73±0.43 a	58.27±0.86 b	60.58±0.91 b	62.49±0.69 b	53.87±1.06 b
	YE	52.90±0.96 a	61.73±0.57 a	64.68±0.80 a	66.67±0.87 a	60.36±0.75 a
	HY	51.29±0.86 a	62.80±0.76 a	65.48±0.52 a	66.13±0.57 a	58.67±0.78 a
2018	CK	45.07±0.75 a	50.23±0.57 b	52.66±0.34 b	56.60±1.07 b	47.19±2.16 b
	YE	46.58±0.31 a	54.76±0.54 a	55.86±1.19 a	61.15±0.44 a	55.16±0.31 a
	HY	45.88±0.62 a	55.26±0.25 a	56.92±0.91 a	61.02±0.20 a	54.56±0.33 a
2019	CK	42.03±0.99 b	48.15±1.03 b	53.43±1.06 b	58.62±1.04 b	48.58±0.93 b
	YE	45.29±0.76 a	55.82±0.85 a	58.82±0.42 a	62.37±0.63 a	53.40±0.74 a
	HY	46.62±0.54 a	56.14±0.25 a	57.58±0.78 a	63.22±0.29 a	52.73±0.28 a

不同小写字母表示在同一年份同一生育期不同处理间在 0.05 水平上差异显著。处理同表 1。

Values followed by different lowercase letters in the same growth stage and the same year are significantly different among treatments at the 0.05 probability level. Treatments are the same as those given in Table 1.

2.3 不同栽培模式下旱地马铃薯光合特性的变化

YE 和 HY 较 CK 能够增加不同降水年型马铃薯在块茎膨大期和淀粉积累期的净光合速率, 处理间差异不显著; 但其冠层光合能力差异显著(表 4)。块

茎膨大期 YE 和 HY 的冠层光合能力在 2018—2019 年较 CK 分别增加 28.38%、31.33%和 33.43%、35.89%; 淀粉积累期分别增加 40.56%、39.81%和 51.74%、49.17%。表明生育后期较强的冠层光合能力为 YE 和 HY 的马铃薯物质生产奠定生理基础。

表 4 不同栽培模式下马铃薯净光合速率和冠层光合能力

Table 4 Net photosynthetic rate and canopy photosynthesis ability of potato under different cultivation models

年份 Year	处理 Treatment	块茎膨大期 Tuber expanding stage		淀粉积累期 Starching accumulation stage	
		净光合速率(CO ₂) Net photosynthetic rate ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	冠层光合能力 Canopy photosynthesis ability ($P_n \times \text{LAI}$)	净光合速率(CO ₂) Net photosynthetic rate ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	冠层光合能力 Canopy photosynthesis ability ($P_n \times \text{LAI}$)
2018	CK	18.92 a	62.72 b	14.69 a	39.81 b
	YE	19.47 a	80.52 a	14.92 a	55.96 a
	HY	19.55 a	83.69 a	15.59 a	60.41 a
2019	CK	19.45 a	65.74 b	15.83 a	44.64 b
	YE	20.22 a	86.34 a	16.36 a	62.41 a
	HY	20.68 a	89.34 a	16.88 a	66.59 a

不同小写字母表示在同一年份同一生育期不同处理间在 0.05 水平上差异显著。处理同表 1。

Values followed by different lowercase letters in the same growth stage and the same year are significantly different among treatments at the 0.05 probability level. Treatments are the same as those given in Table 1.

2.4 不同栽培模式下旱地马铃薯干物质积累与转运

2.4.1 不同栽培模式下马铃薯地上部干物质积累

马铃薯地上部干物质积累量在整个生育期呈单峰曲线变化, 峰值出现在块茎膨大期, 之后逐渐下降(图 3)。YE 和 HY 在整个生育期差异不显著, 但均显著高于 CK。在差异最大的块茎膨大期, YE 的地上部生物量在 2017—2019 年较 CK 分别增加 95.14%、140.55%、133.47%; HY 的分别增加 89.97%、134.98%

和 130.63%; YE 和 HY 间差异不显著。

2.4.2 不同栽培模式下马铃薯块茎膨大前后干物质积累与转运 YE 和 HY 均增加了马铃薯块茎膨大前群体干物质转运量, 但降低了转运率(表 5)。与 CK 相比, YE 干物质转运率在 2017—2019 年分别显著降低 45.49%、48.05%、50.39%; HY 干物质转运率分别显著降低 37.19%、48.96%、51.01%, YE 和 HY 间无显著差异。YE 和 HY 提高了块茎膨大后同化物输入块茎的量及其对块茎的贡献率, 在 2017 年 YE 较 CK

和 HY 显著提高 109.73%、37.75%和 5.89%、6.51%，2018—2019 年与 HY 无显著差异，较 CK 分别提高 69.71%、16.62%和 49.60%、13.32%。HY 的块茎膨

大后同化物输入块茎的量及其对块茎的贡献率在 2017—2019 年较 CK 显著提高 98.05%、67.67%、48.25%和 29.34%、16.56%、11.96%。

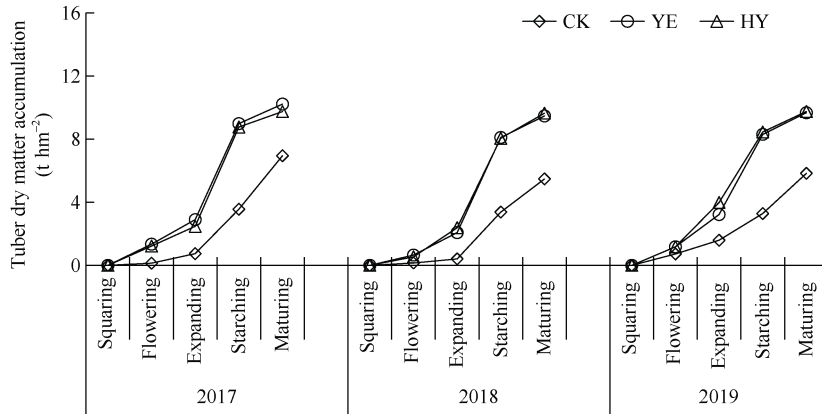


图 3 不同栽培模式下马铃薯地上部干物质的变化

Fig. 3 Change of different models cultivation on aboveground dry matter in potato

表 5 不同栽培模式下马铃薯块茎膨大前后干物质积累与转运

Table 5 Dry matter distribution and accumulation before and after potato tuber expansion under different cultivation modes

年份 Year	处理 Treatment	块茎膨大前干物质 转运量 DMT (kg hm ⁻²)	块茎膨大前干物质 转运率 DMTE (%)	块茎膨大后同化物输入 块茎量 PEA (kg hm ⁻²)	同化物对块茎的 贡献率 CPAT (%)
2017	CK	2800 b	47.07 a	2406 c	46.22 c
	YE	2879 b	25.66 b	5046 a	63.67 a
	HY	3207 a	29.57 b	4765 b	59.78 b
2018	CK	2124 b	70.03 a	2747 b	56.39 c
	YE	2427 a	36.38 b	4662 a	65.76 a
	HY	2401 a	35.74 c	4606 a	65.73 a
2019	CK	2107 b	68.75 a	3111 b	59.61 b
	YE	2236 a	34.11 b	4654 a	67.55 a
	HY	2298 a	33.68 b	4612 a	66.74 a

不同小写字母表示在同一年份不同处理间在 0.05 水平上差异显著。处理同表 1。

DMT: dry matter translocation; DMTE: dry matter translocation efficiency; PEA: post-expansion of tuber dry matter accumulation; CPAT: contribution of post-expansion of tuber assimilates to tuber. Values followed by different lowercase letters in the same year are significantly different among treatments at the 0.05 probability level. Treatments are the same as those given in Table 1.

2.5 不同栽培模式下旱地马铃薯产量及水分利用效率

YE 和 HY 显著提高了马铃薯块茎产量(图 4)。在 2017—2019 年 YE 的块茎产量较 CK 显著增加 71.85%、40.40%、32.38%; HY 较 CK 显著增加 57.67%、51.45%、35.23%。2017 年和 2018 年 YE 和 HY 间差异显著。与 CK 相比, YE 和 HY 的耗水量在 2017—2019 年分别降低 15.37%、11.10%、22.39%和 19.23%、8.98%、18.21%, YE 和 HY 间无显著差异。水分利用效率(WUE)的变化规律与产量相似, 在 2017—2019 年 YE 的较 CK 显著增加

103.07%、57.94%、70.57%; HY 较 CK 显著增加 95.22%、66.38%、65.34%。2018 年 YE 和 HY 间差异显著。

2.6 不同栽培模式对旱地马铃薯养分积累与利用的影响

与 CK 相比, YE 和 HY 的马铃薯氮素总积累量(NTA)和氮素利用效率(NUE)分别增加 17.88%、20.45%和 15.21%、12.37%; YE 的 NUE 较 HY 增加 2.53%, 但二者无显著差异。YE 的氮素收获指数(NHI)较 CK 增加 3.85%, 较 HY 增加 2.53%, HY 和 CK 间差异不显著。

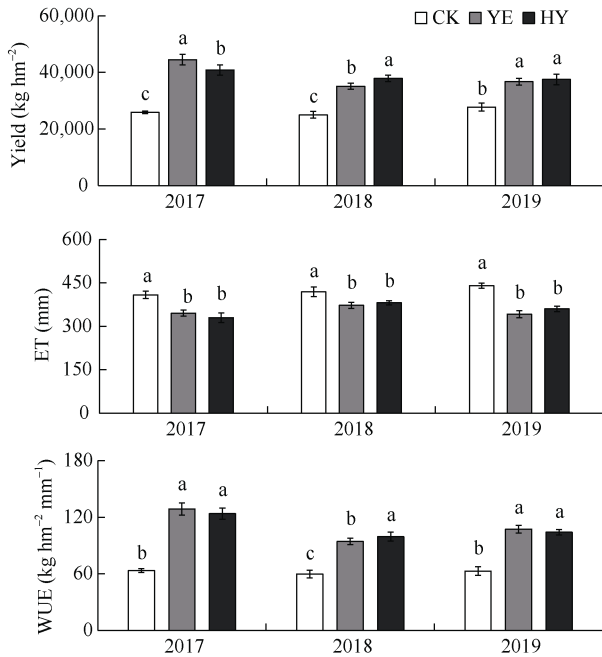


图 4 不同栽培模式下马铃薯产量、耗水量和水分利用效率
Fig. 4 Yield level, evapotranspiration, and water use efficiency of potato under different cultivation models

处理同表 1。不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those given in Table 1. Different small letters in the same year mean significant difference among different treatments at the 0.05 probability level.

处理间磷素总积累量(PTA)差异显著(表 6), YE 和 HY 较 CK 分别增加 6.95%和 31.49%。YE 的磷素利用效率(PUE)较 CK 显著增加 17.20%, 较 HY 的增加 23.41%, 而 HY 和 CK 间无显著差异。处理间磷素收获指数(PHI)无显著差异。

表 6 不同栽培模式下马铃薯肥料积累与利用(2019 年)

Table 6 Fertilizer accumulation and utilization of potato under different cultivation models in 2019

指标 Item	CK	YE	HY
N 氮素总积累量 NTA (kg hm ⁻²)	330.04±5.29 b	389.05±11.32 a	397.54±7.14 a
氮素利用效率 NUE (kg kg ⁻¹)	81.58±0.26 b	93.99±1.65 a	91.67±2.55 a
氮素收获指数 NHI	0.78±0.001 b	0.81±0.001 a	0.79±0.015 b
P 磷素总积累量 PTA (kg hm ⁻²)	24.59±1.18 c	28.45±1.01 b	34.98±0.03 a
磷素利用效率 PUE (kg kg ⁻¹)	1096.72±66.52 b	1285.33±14.38 a	1041.50±11.11 b
磷素收获指数 PHI	0.81±0.015 a	0.81±0.034 a	0.82±0.001 a
K 钾素总积累量 KTA (kg hm ⁻²)	115.34±1.25 b	165.56±6.54 a	164.43±8.44 a
钾素利用效率 KUE (kg kg ⁻¹)	233.43±0.47 a	220.89±1.57 b	221.81±9.21 b
钾素收获指数 KHI	0.77±0.022 b	0.83±0.079 a	0.88±0.024 a

同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。处理同表 1。

NTA: nitrogen total accumulation; NUE: nitrogen use efficiency; NHI: nitrogen harvest index; PTA: phosphorus total accumulation; PUE: phosphorus use efficiency; PHI: phosphorus harvest index; KTA: K total accumulation; KUE: K use efficiency; KHI: K harvest index. Values within a column followed by different lowercase letters are significantly different at the 0.05 probability level. Treatments are the same as those given in Table 1.

YE 和 HY 的马铃薯钾素总积累量(KTA)、钾素收获指数(KHI)均高于 CK (表 6)。其中, YE 的 KTA 和 KHI 较 CK 分别增加 43.54%和 7.79%; HY 的分别增加 42.56%和 14.29%, YE 和 HY 间无显著差异。YE 和 HY 的 KUE 显著低于 CK。

2.7 不同栽培模式对马铃薯经济收益的影响

YE 和 HY 提高了马铃薯块茎的商品率和商品产量(表 7)。其中, 商品率较 CK 在 2017、2018 和 2019 年分别增加 25.7%~43.7%、24.6%~17.4% 和 39.7%~42.7%, 商品产量分别提高 115.9%~126.6%、74.9%~77.7%和 84.9%~93.0%; 相应的经济收益分别增加 86.5%~80.6%、53.9%~61.7%和 49.7%~54.2%, 且 HY 均高于 YE, 但差异不显著。纯收益分别增加 111.2%~81.6%、43.4%~43.9%和 35.2%~29.3%, YE 高于 HY, 差异不显著。

3 讨论

建立高光效的群体是获取高产的核心^[25], 决定群体光合作用的因素有质量因子-单叶光合速率和数量因子-叶面积指数。增加种植密度, 可通过提高叶面积指数来充分利用光照、空间和地力资源, 增加植株光合效率和光合物质积累, 提高产量和资源利用率^[26]。在小麦^[27]、玉米^[20]上研究表明, 相对于普通栽培, 超高产栽培模式(增密)都有较高的叶面积指数。本研究也得出相似的结果, YE 和 HY 整个生育期的 LAI 均显著高于 CK, 表明 YE 和 HY 增密后拥有较大的群体冠层, 能充分利用光、热、水、

表 7 不同栽培模式对马铃薯经济收益的影响

Table 7 Effects on profit of different cultivation models in potato

年份 Year	处理 Treatment	商品率 Commodity rate (%)	商品产量 Commodity yield (kg hm ⁻²)	非商品产量 Non-commodity yield (kg hm ⁻²)	经济收益 Benefit (Yuan hm ⁻²)	生产资料投入 Production materials input (Yuan hm ⁻²)	劳力投入 Labor input (Yuan hm ⁻²)	燃油投入 Fuel input (Yuan hm ⁻²)	纯收益 Profit (Yuan hm ⁻²)
2017	CK	49.76 c	12,887 b	13,011 b	23,271 b	4809	6720	750	10,992 c
	YE	62.53 b	27,828 a	16,679 a	43,401 a	9837	9600	750	23,214 a
	HY	71.50 a	29,199 a	11,636 b	42,020 a	11,305	10,000	750	19,965 b
2018	CK	64.14 c	16,047 b	8972 a	24,639 b	4809	6720	750	12,360 b
	YE	79.90 a	28,066 a	7060 a	37,916 a	9837	9600	750	17,729 a
	HY	75.27 b	28,518 a	9371 a	39,845 a	11,305	10,000	750	17,790 a
2019	CK	49.00 b	13,589 b	14,144 a	24,793 b	4809	6720	750	12,514 b
	YE	68.43 a	25,123 a	11,590 b	37,102 a	9837	9600	750	16,915 a
	HY	69.94 a	26,230 a	11,274 b	38,240 a	11,305	10,000	750	16,185 a

商品薯价格 1.2 元 kg⁻¹, 非商品薯价格 0.6 元 kg⁻¹。生产资料投入包括肥料、地膜、种子, CK 分别为 1020、0、3789 元 hm⁻², 合计 4809 元 hm⁻²; YE 分别为 3435、1350、5052 元 hm⁻², 合计 9837 元 hm⁻²; HY 分别为 4271、1350、5684 元 hm⁻², 合计 11,305 元 hm⁻²。同列不同小写字母表示同一年份不同处理间在 0.05 水平上差异显著。

The price of commodity and non-commodity tuber were 1.2 and 0.6 Yuan per kg, respectively. The production materials input included fertilizer, plastic film and seed, CK were 1020, 0, 3789 Yuan hm⁻², respectively, and the total was 4809 Yuan hm⁻². YE were 3435, 1350, 5052 Yuan hm⁻², respectively, and the total was 9837 Yuan hm⁻². HY were 4271, 1350, 5684 Yuan hm⁻², respectively, and the total were 11,305 Yuan hm⁻². Values followed by different lowercase letters within a column in the same year are signify cantly different among treatments at the 0.05 probability level.

肥资源, 这对作物高产高效有积极的作用; 在降雨较少的 2017 年, YE 的 LAI 在块茎膨大期和淀粉积累期较 HY 分别提高 1.36% 和 3.43%, 对马铃薯高产高效更有利。保持叶片绿色, 可延缓叶片衰老和延长叶片的光合作用时间, 从而提高群体光合^[28]。但是, 氮肥亏缺易造成叶面积指数和 SPAD 值降低, 导致光能截获量和光能利用率下降^[29]; 氮肥过量会加速生育后期的叶片衰老, 使光合功能期缩短, 产量降低^[30]。增加密度会增强个体对养分的竞争, 导致叶片叶绿素含量下降使光合受阻, 而肥料效应可通过提高个体光合速率影响群体光合性能, 在产量形成关键生育期对密度效应进行补偿^[6]。本试验条件下, YE 和 HY 在密度和缓释氮肥同步增加的模式下马铃薯叶片 SPAD 值显著高于 CK, 块茎膨大期和淀粉积累期 YE 均高于 HY。表明通过密度和肥料优化可以提高作物的 SPAD 值, 为提高光合效率奠定了物质基础。另外, 采取合理的栽培措施来减缓作物生育后期叶面积的衰减速度, 保持较高的群体光合势, 是作物增产的重要途径^[31]。张仁和等^[32]在玉米上研究表明, 与普通大田栽培相比, 高产和超高产栽培的玉米通过维持高的叶面积指数和 SPAD 值来改善玉米叶片光合性能, 为籽粒灌浆提供了较充足的光合同化物。本研究中, 与块茎膨大期相比, YE 和 HY

的 LAI 和叶片 SPAD 值在淀粉积累期下降幅度低于 CK。较高的 LAI 和叶片 SPAD 值维持了较好的光合性能, 使其冠层光合能力在 2018 和 2019 年的块茎膨大期较 CK 分别增加 28.38%、46.52% 和 31.33%、49.24%; 淀粉积累期分别增加 33.43%、58.18% 和 35.89%、59.23%, 这为马铃薯块茎的膨大提供充足的光合同化物。因此, YE 和 HY 通过增加密度优化了群体结构, 提高马铃薯的 LAI 和 SPAD 值, 肥料效应对增密后个体养分竞争的弥补减缓了生育后期 LAI 和 SPAD 降低幅度, 保持较高的冠层光合能力, 这为产量潜力的发挥奠定了物质基础。

YE 和 HY 通过密度和肥料的优化虽增加了群体冠层光合能力和时间, 但黑色地膜覆盖后其耗水量较 CK 3 年平均降低 16.29% 和 15.47%。虽然增加密度后相应的作物蒸腾增加了, 但在地膜覆盖和增密条件下, 马铃薯蒸腾量仍小于土面的无效蒸发, 有限的降水用于作物的生长, 使地上干物质积累量在块茎膨大期较 CK 3 年平均增加了 123.05% 和 118.53%。马铃薯产量的形成是同化产物积累和分配的结果^[33], 在增加干物质积累的同时, 必须促进同化产物的合理分配, 提高干物质的有效利用率。这一过程因施肥和养分管理栽培条件的不同而有很大差异^[34]。旱地玉米高产栽培模式降低了其花前干

物质的转运量, 提高花后干物质积累量及其对籽粒的贡献率是其高产与水分协同提高的物质基础^[17]; 且施用控释尿素可以增加干物质向开花后分配的比例^[14]。本试验条件下, YE 和 HY 显著增加马铃薯全生育期干物质积累量, 降低马铃薯块茎膨大前的群体干物质转运率, 并提高块茎膨大后同化物输入块茎量及其对块茎的贡献率, 使块茎产量在 2017—2019 年分别增加 71.85%、40.40%、32.38% 和 57.67%、51.45%、35.23%, 对应的水分利用效率分别提高 103.07%、57.94%、70.57% 和 95.22%、66.38%、65.34%。这与刘星等^[24]在马铃薯上的研究结果一致。YE 较 HY 的 WUE 提高 2.05%, 而 3 年平均产量相当, 这主要是本研究选择的品种为陇薯 10 号, 试验期间部分发生了晚疫病, 造成减产, 导致 HY 超高产潜力没有充分发挥。另外, YE 和 HY 不仅增加了马铃薯的块茎产量, 而且提高了商品率, 使得商品产量显著增加, 分别较 CK 在 2017—2019 年平均提高 90.5% 和 97.4%, 商品产量的增加使纯收益显著分别增加 7330.3 元 hm^{-2} 和 6024.6 元 hm^{-2} ; YE 较 HY 纯收益增加 1305.7 元 hm^{-2} 。因此, YE 和 HY 通过优化栽培模式有效地利用了有限的降水, 使马铃薯群体发育增强, 提高马铃薯产量、水分利用效率和经济效益, 实现了增产增效的目标。

优化栽培模式能克服常规栽培模式对养分资源利用管理的不足, 提高产量、增加养分利用效率^[35-36]。有研究表明, 超高产栽培的水稻 N、P、K 总吸收量和产谷效率均高于普通高产栽培^[37]; 超高产栽培的玉米 N、P、K 积累量和收获指数均高于普通高产栽培^[38]。本试验条件下, YE 和 HY 通过黑膜覆盖、增加密度和合理施肥等栽培措施集成优化后促进了马铃薯的群体发育, 增加作物养分吸收量, 使 YE 的 N、P 利用效率较 CK 分别增加了 15.21% 和 17.20%; HY 的 N 利用效率增加了 12.37%。但二者均降低了 K 利用效率, 这可能与黄土高原土壤钾含量较高、施钾肥造成利用率降低有关。同时, YE 的 N、K 收获指数较 CK 分别增加了 3.85% 和 7.79%; 而 HY 的 N、P 收获指数与 CK 无显著差异, 表明通过优化栽培管理模式可促进作物对肥料的吸收利用。而且与 HY 相比, YE 的 N、P 利用效率分别增加了 2.53% 和 23.41%; N 收获指数增加了 2.53%, 更有利于肥料的高效吸收利用, 协同实现了马铃薯高产和水肥高效。

4 结论

高产高效和超高产栽培均增加了马铃薯叶片的 SPAD 值和群体 LAI, 并减缓了块茎膨大后叶片 SPAD 值和群体 LAI 的降低幅度, 保持了较高的冠层光合能力。地上群体生物量显著增加, 并提高了块茎膨大同化物对块茎产量的贡献率, 导致块茎产量和水分利用效率显著增加, 提高了商品薯产量, 3 年较 CK 分别新增纯收益 7330.3 元 hm^{-2} 和 6024.6 元 hm^{-2} 。高产高效和超高产栽培均显著提高了 N、P、K 的总积累量、收获指数和 N、P 利用效率。与超高产栽培模式相比, 高产高效模式减施 40% 缓释尿素后, 在不减产的基础上, 显著增加了 WUE 和 N、P 利用效率, 新增纯收益 1305.7 元 hm^{-2} , 实现作物增产和资源高效利用协同发展, 是半干旱区黑膜覆盖马铃薯种植推荐的高产高效模式。

References

- [1] 农业部. 2017 年全国各地蔬菜、瓜果(西瓜、甜瓜、草莓等)、马铃薯播种面积和产量. 中国蔬菜, 2019, (11): 22. Ministry of Agriculture. The nationwide plant area and yield of vegetable, watermelon, melon, strawberry, potato in 2017. *China Veget*, 2019, (11): 22 (in Chinese with English abstract).
- [2] 侯慧芝, 王娟, 张绪成, 方彦杰, 于显枫, 王红丽, 马一凡. 半干旱区全膜覆盖垄上微沟种植对土壤水热及马铃薯产量的影响. 作物学报, 2015, 41: 1582-1590. Hou H Z, Wang J, Zhang X C, Fang Y J, Yu X F, Wang H L, Ma Y F. Effects of mini-ditch planting with plastic mulching in ridges on soil water content, temperature and potato yield in rain-fed Semiarid Region. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 1582-1590 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王晓明, 陈士宾, 牛俊义. 陇中半干旱地区马铃薯经济产量及效益模式探讨. 干旱地区农业研究, 1991, 6(2): 175-179. Wang X M, Chen S B, Niu J Y. Discussion on the economical yield and benefit model of potatoes in Semiarid Area in the middle part of Gansu province. *Agric Res Arid Areas*, 1991, 6(2): 175-179 (in Chinese with English abstract).
- [4] 方彦杰, 张绪成, 侯慧芝, 于显枫, 王红丽, 马一凡. 近 20 年来甘肃省黄土高原区粮食产量的影响因素及未来粮食需求分析. 中国农业科技导报, 2015, 17(4): 165-175. Fang Y J, Zhang X C, Hou H Z, Yu X F, Wang H L, Ma Y F. Influence factors of grain yield in the Loess Plateau of Gansu Province during the latest 20 years and analysis on its future grain requirement. *J Agric Sci Technol*, 2015, 17(4): 165-175 (in Chinese with English abstract).
- [5] 王红丽, 张绪成, 于显枫, 马一凡, 侯慧芝. 黑色地膜覆盖的土壤水热效应及其对马铃薯产量的影响. 生态学报, 2016, 36: 5215-5226. Wang H L, Zhang X C, Yu X F, Ma Y F, Hou H Z. Effect of using black plastic film as mulch on soil temperature and moisture and potato yield. *Acta Ecol Sin*, 2016, 36: 5215-5226 (in Chinese).

- with English abstract).
- [6] 曹倩, 贺明荣, 代兴龙, 门洪文, 王成雨. 密度、氮肥互作对小麦产量及氮素利用效率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17: 815–822.
Cao Q, He M R, Dai X L, Men H W, Wang C Y. Effect of interaction between density and nitrogen on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat. *Plant Nutr Fert Sci*, 2011, 17: 815–822 (in Chinese with English abstract).
- [7] 段民孝. 从农大 108 和郑单 958 中得到的玉米育种启示. *玉米科学*, 2005, 13(4): 49–52.
Duan M X. Some advice on corn breeding obtained from the elite varieties of Nongda 108 and Zhengdan 958. *J Maize Sci*, 2005, 13(4): 49–52 (in Chinese with English abstract).
- [8] 曹胜彪, 张吉旺, 董树亭, 刘鹏, 赵斌, 杨今胜. 施氮量和种植密度对高产夏玉米产量和氮素利用效率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18: 1343–1353.
Cao S B, Zhang J W, Dong S T, Liu P, Zhao B, Yang J S. Effects of nitrogen rate and planting density on grain yield and nitrogen utilization efficiency of high yield summer maize. *Plant Nutr Fert Sci*, 2012, 18: 1343–1353 (in Chinese with English abstract).
- [9] 吕丽华, 陶洪斌, 王璞, 刘明, 赵明, 王润正. 种植密度对夏玉米碳氮代谢和氮利用率的影响. *作物学报*, 2008, 34: 718–723.
Lyu L H, Tao H B, Wang P, Liu M, Zhao M, Wang R Z. Carbon and nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency in summer maize under different planting densities. *Acta Agron Sin*, 2008, 34: 718–723 (in Chinese with English abstract).
- [10] Zhou B Y, Sun X F, Ding Z S, Ma W, Zhao M. Multisplit nitrogen application via drip irrigation improves maize grain yield and nitrogen use efficiency. *Crop Sci*, 2017, 57: 1687–1703.
- [11] 赵风华, 马军花, 欧阳竹. 过量施氮对冬小麦生产力的影响. *植物生态学报*, 2012, 36: 1075–1081.
Zhao F H, Ma J H, Ou-yang Z. Effects of excessive nitrogen supply on productivity of winter wheat. *Chin J Plant Ecol*, 2012, 36: 1075–1081 (in Chinese with English abstract).
- [12] 宁运旺, 马洪波, 张辉, 汪吉东, 许仙菊, 张永春. 甘薯源库关系建立、发展和平衡对氮肥用量的响应. *作物学报*, 2015, 41: 432–439.
Ning Y W, Ma H B, Zhang H, Wang J D, Xu X J, Zhang Y C. Response of sweetpotato in source-sink relationship establishment, expanding, and balance to nitrogen application rates. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 432–439 (in Chinese with English abstract).
- [13] 郭恒, 陈占全, 张亚丽, 高玉亭, 李月梅. 全膜覆盖条件下缓释氮肥对马铃薯干物质及产量的影响. *河南农业科学*, 2013, 42(6): 37–41.
Guo H, Chen Z Q, Zhang Y L, Gao Y T, Li Y M. Effects of slow-released urea on dry matter and yield of potato under plastic film mulching condition. *J Henan Agric Sci*, 2013, 42(6): 37–41 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王永军, 孙其专, 杨今胜, 王空军, 董树亭, 袁翠平, 王立春. 不同地力水平下控释尿素对玉米物质生产及光合特性的影响. *作物学报*, 2011, 37: 2233–2240.
Wang Y J, Sun Q Z, Yang J S, Wang K J, Dong S T, Yuan C P, Wang L C. Effects of controlled-release urea on yield and photosynthesis characteristics of maize (*Zea mays* L.) under different soil fertility conditions. *Acta Agron Sin*, 2011, 37: 2233–2240 (in Chinese with English abstract).
- [15] 席旭东, 李效文, 姬丽君. 缓控释肥不同施用量和施用方式对旱作区全膜马铃薯生长及产量的影响. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(5): 193–197.
Xi X D, Li X W, Ji L J. Effects of different fertilization methods and amounts slow/controlled releasing fertilizer on growth and yield of all-film potato in dry farming areas. *Agric Res Arid Areas*, 2016, 34(5): 193–197 (in Chinese with English abstract).
- [16] 刘兆辉, 吴小宾, 谭德水, 李彦, 江丽华. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应. *中国农业科学*, 2018, 51: 3827–3839.
Liu Z H, Wu X B, Tan D S, Li Y, Jiang L H. Application and environmental effects of one-off fertilization technique in major cereal crops in china. *Sci Agric Sin*, 2018, 51: 3827–3839 (in Chinese with English abstract).
- [17] 王月超, 李传兴, 代兴龙, 周晓燕, 张宇, 李华英, 贺明荣. 栽培模式对冬小麦光能利用和产量的影响. *应用生态学报*, 2015, 26: 2707–2713.
Wang Y C, Li C X, Dai X L, Zhou X Y, Zhang Y, Li H Y, He M R. Effects of cultivation patterns on the radiation use and grain yield of winter wheat. *J Appl Ecol*, 2015, 26: 2707–2713 (in Chinese with English abstract).
- [18] 张仁和, 胡富亮, 杨晓钦, 高杰, 郝引川, 张兴华, 薛吉全. 不同栽培模式对旱地春玉米光合特性和水分利用率的影响. *作物学报*, 2013, 39: 1619–1672.
Zhang R H, Hu F L, Yang X Q, Gao J, Hao Y C, Zhang X H, Xue J Q. Effects of different cultivation patterns on photosynthetic characteristics and water use efficiency in dryland spring maize. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 1619–1627 (in Chinese with English abstract).
- [19] 王洪章, 刘鹏, 贾绪存, 李静, 任昊, 董树亭, 张吉旺, 赵斌. 不同栽培管理条件下夏玉米产量与肥料利用效率的差异解析. *作物学报*, 2019, 45: 1544–1553.
Wang H Z, Liu P, Jia X C, Li J, Ren H, Dong S T, Zhang J W, Zhao B. Analysis of differences in summer maize yield and fertilizer use efficiency under different cultivation managements. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 1544–1553 (in Chinese with English abstract).
- [20] 张玉芹, 杨恒山, 高聚林, 张瑞富, 王志刚, 徐寿军, 范秀艳, 杨升辉. 超高产春玉米冠层结构及其生理特性. *中国农业科学*, 2011, 44: 4367–4376.
Zhang Y Q, Yang H S, Gao J L, Zhang R F, Wang Z G, Xu S J, Fan X Y, Yang S H. Study on canopy structure and physiological characteristics of super-high yield spring maize. *Sci Agric Sin*, 2011, 44: 4367–4376 (in Chinese with English abstract).
- [21] 王立为, 潘志华, 高西宁, 陈东东, 张璐阳, 程路, 周蒙蒙, 李超, 赵沛义. 不同施肥水平对旱地马铃薯水分利用效率的影响. *中国农业大学学报*, 2012, 17(2): 54–58.
Wang L W, Pan Z H, Gao X N, Chen D D, Zhang L Y, Cheng L, Zhou M M, Li C, Zhao P Y. Influence of different fertilizer levels water use efficiency of the potato in the dry land. *J China Agric Univ*, 2012, 17(2): 54–58 (in Chinese with English abstract).
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000. pp 408–421.
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000. pp 408–421 (in Chinese).

- [23] 王永华, 黄源, 辛明华, 苑沙沙, 康国章, 冯伟, 谢迎新, 朱云集, 郭天财. 周年氮磷钾配施模式对砂姜黑土麦玉轮作体系籽粒产量和养分利用效率的影响. *中国农业科学*, 2017, 50: 1031–1046.
Wang Y H, Huang Y, Xin M H, Yuan S S, Kang G Z, Feng W, Xie Y X, Zhu Y J, Guo T C. Effects of the year-round management model of N, P and K combined application on grain yield and nutrient efficiency of wheat-maize rotation system in lime concretion black soil. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 1031–1046 (in Chinese with English abstract).
- [24] 刘星, 张书乐, 刘国锋, 邱慧珍, 王蒂, 张俊莲, 沈其荣. 连作对甘肃中部沿黄灌区马铃薯干物质积累和分配的影响. *作物学报*, 2014, 40: 1274–1285.
Liu X, Zhang S L, Liu G F, Qiu H Z, Wang D, Zhang J L, Shen Q R. Effect of continuous cropping on dry matter accumulation and distribution of potato plants in the yellow river irrigation areas of middle Gansu province. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 1274–1285 (in Chinese with English abstract).
- [25] 李少昆, 王崇桃. 作物株型和冠层结构信息获取与表述的方法. *石河子大学学报(自然科学版)*, 1997, 1: 250–256.
Li S K, Wang C T. The methods of obtaining and expressing information of crop plant shape and population structure. *J Shihezi Univ (Nat Sci)*, 1997, 1: 250–256 (in Chinese with English abstract).
- [26] 陈雨海, 余松烈, 于振文. 小麦生长后期群体光截获量及其分布与产量的关系. *作物学报*, 2003, 29: 730–734.
Chen Y H, Yu S L, Yu Z W. Relationship between amount or distribution of PAR interception and grain output of wheat communities. *Acta Agron Sin*, 2003, 29: 730–734 (in Chinese with English abstract).
- [27] 高海涛, 王育红, 孟战赢, 吴少辉, 张园. 超高产小麦产量及旗叶生理特性的研究. *麦类作物学报*, 2010, 30: 1080–1084.
Gao H T, Wang Y H, Meng Z Y, Wu S H, Zhang Y. Study on grain yield and physiological characteristics of flag leaves in super high yield winter wheat. *J Triticeae Crops*, 2010, 30: 1080–1084 (in Chinese with English abstract).
- [28] 董树亭, 高荣歧, 胡昌浩, 王群瑛, 王空军. 玉米花粒期群体光合性能与高产潜力的研究. *作物学报*, 1997, 23: 318–325.
Dong S T, Gao R Q, Hu C H, Wang Q Y, Wang K J. Study of canopy photosynthesis property and high yield potential after anthesis in maize. *Acta Agron Sin*, 1997, 23: 318–325 (in Chinese with English abstract).
- [29] Fletcher A L, Johnstone P R, Chakwizira E, Brown H E. Radiation capture and radiation use efficiency in response to N supply for crop species with contrasting canopies. *Field Crops Res*, 2013, 150: 126–134.
- [30] 孙旭生, 林琪, 李玲燕, 姜雯, 翟延举. 氮素对超高产小麦生育后期光合特性及产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14: 840–844.
Sun X S, Lin Q, Li L Y, Jiang W, Zhai Y J. Effect of nitrogen supply on photosynthetic characteristics at later developing stages and yield in super high-yield winter wheat. *Plant Nutr Fert Sci*, 2008, 14: 840–844 (in Chinese with English abstract).
- [31] 高聚林, 刘克礼, 张永平, 杨永梅, 宋瑞华, 薛凤成, 于金刚, 卞宏淳, 李秀芬, 王洪军. 不同栽培措施对旱作春小麦叶面积和光合势的影响. *麦类作物学报*, 2003, 23: 66–70.
Gao J L, Liu K L, Zhang Y P, Yang Y M, Song R H, Xue F C, Yu J G, Bian H C, Li X F, Wang H J. Effect of different cultivation measures on LAD and LAI of spring wheat in dryland. *J Triticeae Crops*, 2003, 23: 66–70 (in Chinese with English abstract).
- [32] 张仁和, 王博新, 杨永红, 杨晓军, 马向峰, 张兴华, 郝引川, 薛吉全. 陕西灌区高产春玉米物质生产与氮素积累特性. *中国农业科学*, 2017, 50: 2238–2246.
Zhang R H, Wang B X, Yang Y H, Yang X J, Ma X F, Zhang X H, Hao Y C, Xue J Q. Characteristics of dry matter and nitrogen accumulation for high-yielding maize production under irrigated conditions of Shaanxi. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 2238–2246 (in Chinese with English abstract).
- [33] 高聚林, 刘克礼, 张宝林, 任有志. 马铃薯干物质积累与分配规律的研究. *中国马铃薯*, 2003, 17(4): 209–212.
Gao J L, Liu K L, Zhang B L, Ren Y Z. Accumulation and distribution of dry matter in potato. *Chin Potato J*, 2003, 17(4): 209–212 (in Chinese with English abstract).
- [34] 张宝林, 高聚林, 刘克礼, 盛晋华. 旱作马铃薯氮素的吸收、积累和分配规律. *中国马铃薯*, 2003, 17(4): 193–198.
Zhang B L, Gao J L, Liu K L, Sheng J H. Nitrogen absorption, accumulation and distribution of potato under farming. *Chin Potato J*, 2003, 17(4): 193–198 (in Chinese with English abstract).
- [35] Sainz H R, Echeverria H E, Barbie A. Nitrogen balance as affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no-tillage maize. *Agron J*, 2004, 96: 1622–1631.
- [36] He P, Li S T, Jin J Y, Wang H T, Li C J, Wang Y L, Cui R Z. Performance of an optimized nutrient management system for double-cropped wheat-maize rotations in North-central China. *Agron J*, 2009, 101: 1489–1496.
- [37] 杜永, 刘辉, 杨成, 王志琴, 杨建昌. 超高产栽培迟熟中粳稻养分吸收特点的研究. *作物学报*, 2007, 33: 208–215.
Du Y, Liu H, Yang C, Wang Z Q, Yang J C. Characteristics of nutrient absorption in super-high-yielding mid-season and late-maturity japonica rice. *Acta Agron Sin*, 2007, 33: 208–215 (in Chinese with English abstract).
- [38] 杨恒山, 高聚林, 张玉芹, 毕文波, 张瑞富, 范秀艳, 高强. 超高产春玉米氮磷钾养分吸收与利用的研究. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(2): 15–20.
Yang H S, Gao J L, Zhang Y Q, Bi W B, Zhang R F, Fan X Y, Gao Q. Studies on absorption and use of N, P and K by spring maize under super-yield cultivation. *Agric Res Arid Areas*, 2011, 29(2): 15–20 (in Chinese with English abstract).