

氮密互作对旱作马铃薯光合特性、 干物质积累及产量的影响

王春艳,孟浩峰,李玲玲,谢军红,王林林,刘秉鑫,田鑫,包小燕

(甘肃农业大学农学院/甘肃省干旱生境作物学国家重点实验室,甘肃兰州730070)

摘要:为筛选陇中旱农区马铃薯适宜的施氮量和种植密度,以‘陇薯16号’为供试品种,设置2个施氮量:200 kg·hm⁻²(N1)和300 kg·hm⁻²(N2),3个种植密度:3.75(D1)、5.25(D2)、6.75(D3)万株·hm⁻²,共6个处理,分析不同施氮量和种植密度对马铃薯光合特性、干物质积累与产量的影响。结果表明:在淀粉积累期,N1D2处理叶面积指数较N1D1处理提高11.91%;在块茎膨大期,N1D2处理Rubisco活性较N1D3处理提高9.05%;块茎膨大期和淀粉积累期,N1D2处理的叶片光合速率、蒸腾速率和气孔导度最大,两个时期干物质积累量较其他处理分别提高5.29%~31.12%和8.82%~27.49%;N1D2处理下产量和净收益最高,2022年分别较其他处理提高6.14%~36.21%和5.13%~169.16%,2023年分别较其他处理提高4.11%~29.46%和21.56%~76.55%。在陇中旱农区,‘陇薯16号’生产中推荐施氮量为200 kg·hm⁻²,种植密度为5.25万株·hm⁻²,能够保证马铃薯产量,同时提高其经济效益。

关键词:旱作马铃薯;氮密互作;光合特性;干物质积累;产量

中图分类号:S532;S359 **文献标志码:**A

Effects of nitrogen-dense interaction on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and yield of dryland potatoes

WANG Chunyan, MENG Haofeng, LI Lingling, XIE Junhong,

WANG Linlin, LIU Bingxin, TIAN Xin, BAO Xiaoyan

(College of Agriculture, Gansu Agricultural University, State Key Laboratory
of Arid Land Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to select suitable nitrogen application rates and planting densities for the green and sustainable production of dryland potatoes in dryland farming area of central Gansu. In this study, ‘Longshu 16’ was selected as the test potato variety. Two nitrogen application rates 200 kg·hm⁻²(N1) and 300 kg·hm⁻²(N2) and three planting densities 37 500 plants·hm⁻²(D1), 52 500 plants·hm⁻²(D2), and 67 500 plants·hm⁻²(D3) were used, resulting in a total of six treatments. The effects of these treatments on the photosynthetic characteristics, dry matter accumulation, and yield of ‘Longshu 16’ were examined. The results showed that the leaf area index of N1D2 treatment was 11.91% higher than that of N1D1 treatment during starch accumulation stage. At the tuber swelling stage, the activity of Rubisco enzyme in N1D2 treatment was increased by 9.05% compared with N1D3 treatment. From tuber swelling stage to starch accumulation stage, the photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance of leaves in N1D2 treatment were the largest, and the dry matter accumulation was increased by 5.29%~31.12% and 8.82%~27.49%, respectively, compared with other treatments. The yield and economic benefits were the highest under N1D2 treatment. In 2022, it increased by 6.14%~36.21% and

收稿日期:2024-02-07

修回日期:2024-05-17

基金项目:甘肃省青年科技基金计划项目(23JRRA1437);省部共建干旱生境作物学国家重点实验室开放基金(GSCS-2022-04);甘肃农业大学公招博士科研启动基金(GAU-KYQD-2021-43);甘肃省教育厅—优秀研究生“创新之星”项目(2023CXZX-650)

作者简介:王春艳(1998-),女,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为作物栽培生理。E-mail:3535274309@qq.com

通信作者:李玲玲(1977-),女,甘肃天水人,教授,主要从事旱地与绿洲农作制研究。E-mail:lill@gsau.edu.cn

孟浩峰(1991-),男,甘肃金昌人,副教授,主要从事作物栽培生理研究。E-mail:menghf@gsau.edu.cn

5.13%~169.16% compared with other treatments, and in 2023, it increased by 4.11%~29.46% and 21.56%~76.55%. The recommended nitrogen application rate for 'Longshu 16' production in the Longzhong arid agricultural region is 200 kg · hm⁻², with a planting density of 52 500 plants · hm⁻². This combination can enhance economic benefits while maintaining yield.

Keywords: dryland potato; nitrogen-dense interaction; photosynthetic properties; dry matter accumulation; yield

甘肃省是我国马铃薯优势主产区,该地区马铃薯种植面积约 68 万 hm⁻²,但单产低于世界平均水平^[1]。提高马铃薯单产水平对于该区域农业发展和粮食安全具有重要意义,研究马铃薯区域高产耕作栽培技术迫在眉睫。

氮素是影响马铃薯生长发育、光合作用和块茎产量的重要元素^[2-4]。马铃薯生育前期,氮素主要集中在植株地上部的组织器官,可提高出苗率,增强植株抗性;生育后期,氮素可减缓植株叶片的衰老速度,提高光合性能,有利于块茎中养分的吸收及干物质的积累^[5]。研究表明,合理施氮能促进马铃薯茎叶生长,增加植株同化面积,延长叶片功能期,提高光合生产率,从而提高块茎的干物质和产量,氮肥不足会造成植株营养不良,生长缓慢,产量降低^[6];过量施用氮肥则导致地上部茎叶徒长,地下部结薯延迟甚至不结薯,影响马铃薯产量提高^[7]。种植密度决定作物群体密度,其通过影响植株营养状况和光能截获量而作用于群体光合特性及干物质积累,进而影响作物产量和品质^[8-9]。研究表明,种植密度会影响植株的养分吸收和生长发育,合理的种植密度对建立和优化马铃薯合理的群体结构有重要作用^[10]。不同品种马铃薯适宜种植密度有所不同,密度过高或过低均不利于其光合作用以及块茎产量的形成^[11-12]。

陇中旱农区是甘肃马铃薯的特色产区,该地区属黄土丘陵沟壑区,土壤条件为少氮富钾,因缺少科学的施肥标准,马铃薯生产上普遍存在氮肥施用量不合理的问题,甘肃省中部地区施氮量过高的种植户占比达 15.1%^[13];且当地马铃薯栽培方式粗放,生产上基本未考虑氮肥与种植密度的互作效应^[14],确定适宜的施氮量和种植密度对该地区马铃薯绿色可持续生产具有重要意义。因此,本研究以'陇薯 16 号'为材料,通过探究不同施氮量和种植密度对马铃薯植株光合性能、干物质积累及产量构成的影响,确定陇中旱农区马铃薯生产适宜的施氮量及种植密度,以期当地化肥减施增效和马铃薯绿色可持续生产提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2022—2023 年在甘肃省定西市李家堡镇甘肃农业大学旱作农业综合试验站(35°35'N, 104°36'E)进行,试验站位于甘肃省中部偏南,属中温带半干旱区,平均海拔 2 000 m,年均太阳辐射 592.85 kJ · cm⁻²,日照时数 2 476.6 h,年均气温 6.4℃,≥0℃积温 2 933.5℃,≥10℃积温 2 239.1℃,无霜期 140 d;多年平均降水量 390.9 mm,年蒸发量 1 531 mm,干燥度 2.53,是典型的半干旱雨养农业区。试区土壤为典型黄绵土,土质较绵软,质地均匀,0~30 cm 土层土壤平均容重为 1.26 g · cm⁻³,pH 值 8.39,土壤有机质 10.71 g · kg⁻¹,全氮 0.71 g · kg⁻¹,全磷 1.59 g · kg⁻¹,速效磷 27.32 mg · kg⁻¹,速效钾 151.66 mg · kg⁻¹。2022—2023 年降水量如图 1 所示。

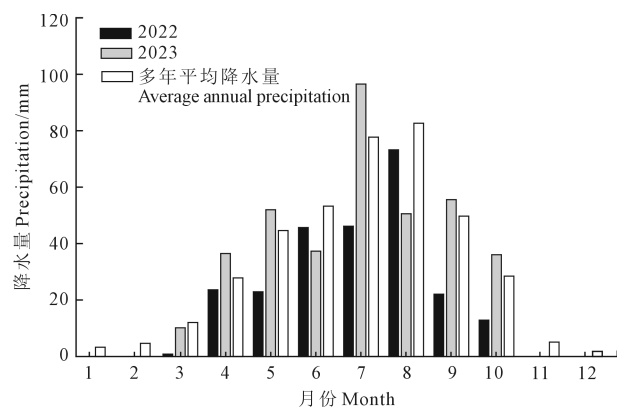


图 1 2022—2023 年试验区降水量

Fig.1 Precipitation in the experimental area during 2022–2023

1.2 试验设计

试验采用双因素随机区组设计,设置 2 个施氮量(N),分别为 200 kg · hm⁻²(N1)和 300 kg · hm⁻²(N2),3 个种植密度(D),分别为 3.75(D1)、5.25(D2)、6.75(D3)万株 · hm⁻²,共 6 个处理(N1D1、N1D2、N1D3、N2D1、N2D2、N2D3),其中 N2D1 处理为当地常规施氮和常规种植密度组合,各处理 3 次重复,共 18 个小区,小区面积 40 m²(4 m×10 m)。供试马铃薯品种为'陇薯 16 号',采用覆膜宽垄双

行种植方式,2022 年 4 月 26 日播种,10 月 5 日收获;2023 年 4 月 30 日播种,10 月 7 日收获。供试氮肥为尿素(N 46%),各处理生育期磷肥(过磷酸钙, P_2O_5 12%)和钾肥(硫酸钾, K_2O 24%)施用量分别为 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $292.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,所有肥料均在播种时全部撒施。马铃薯生育期无灌溉,其余田间管理措施同当地大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶面积指数 在马铃薯的现蕾期、块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期,各处理分别选取 20 片叶片,采用打孔称重法测定马铃薯叶片的叶面积指数,各小区测定 3 次,取平均值。用孔径 1.22 cm 的单孔打孔器,避开中心叶脉和已经枯萎的部分打孔,将各处理打下的圆形叶片分别计数并装入纸袋烘干(75°C 下烘 48 h)、称重(W_1, g),剩余叶片装入纸袋烘干、称重(W_2, g),打孔器半径为 $r(\text{cm})$,叶面积及叶面积指数计算公式如下:

$$\text{叶面积}(\text{cm}^2) = (W_1 + W_2) \times \text{打孔数} \times \pi r^2 \times 10^{-2} / W_1$$

$$\text{叶面积指数} = \text{叶面积} / \text{土地面积}$$

1.3.2 光合参数 在马铃薯的块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期,于晴朗天气的 9:00—11:00,利用便携式光合-荧光测量系统(GFS-3000,德国),测定各处理植株完全展开的上位叶茎端倒二叶或倒三叶的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i),各小区分别测定 3 个植株,3 次重复取平均值。

1.3.3 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶加氧酶(Rubisco)活性 在马铃薯的块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期,各处理分别取 15 片长势均匀植株的倒 4 叶复叶,采用双抗体一步夹心法酶联免疫吸附试验试剂盒(江苏酶标生物科技有限公司)测定 Rubisco 活性,用底物 3,3',5,5'-四甲基联苯胺显色,用酶标仪(Sunrise 全自动酶标仪 F50,瑞士)在 450 nm 波长下测定吸光度(OD 值),计算样品活性。以空白试验作参比调零,将吸光值分别带入对应的标准曲线:

$$\text{Rubisco 活性}(\text{U} \cdot \text{g}^{-1}) = 9.4458x - 0.4944$$

$$R^2 = 0.9994$$

1.3.4 干物质积累量 在马铃薯现蕾期、块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期和成熟期,各小区分别取长势均匀的 3 个植株,整株挖出, 105°C 下杀青 30 min 后 85°C 烘至恒重,各处理分别称重,测定地上部干物质质量和块茎干物质质量。

1.3.5 产量及产量构成因素 在马铃薯收获期,分别测定各小区的块茎产量,折算各处理公顷产量。各小区每行随机取样 15 株马铃薯,分别测定各处理

单株结薯数和单薯质量。

1.3.6 马铃薯经济效益 试验总投入包括马铃薯种子、化肥、机械和人工等成本,投入价格按实际支出计算,总收益和净收益计算公式如下:

$$\text{总收益}(\text{CNY} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{马铃薯销售价格} \times \text{马铃薯产量}$$

$$\text{净收益}(\text{CNY} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{总收益} - \text{总投入}$$

1.3.7 数据处理分析 采用 Microsoft Excel 2021 整理数据,2022 年和 2023 年叶面积指数、光合参数和干物质积累量变化规律相同,各指标取两年平均值进行分析。使用 SPSS 18.0 进行双因素方差分析、相关性分析和通径分析,通过 Duncan's 多重比较进行处理间显著性检验($P < 0.05$, $P < 0.01$),使用 Origin Pro 2022 作图。

2 结果与分析

2.1 氮密互作下马铃薯叶面积指数的变化

由图 2 可知,马铃薯植株的叶面积指数随生育期推进均表现出先上升后下降的趋势,最高值出现在块茎膨大期。在现蕾期,N2 处理下马铃薯叶面积指数均大于 N1 处理,且随种植密度的增加呈增加趋势;在块茎形成期,N1D3 处理的叶面积指数较 N1D1 和 N1D2 处理增幅为 3.73%~4.62%,N2D2 处理较 N1D2 提高 13.00%;在块茎膨大期,各处理间叶面积指数差异均不显著;在淀粉积累期,N1D2 处理叶面积指数较 N1D1 和 N1D3 处理分别提高 11.91% 和 11.63%,N1D2 处理较 N2D2 提高 5.83%,差异不显著。

2.2 氮密互作下马铃薯光合参数的变化

如图 3A 所示,马铃薯净光合速率随生育期推进表现为下降趋势,各时期相同施氮量下净光合速率均表现为 $D2 > D1 > D3$ 。在块茎形成期,相同种植

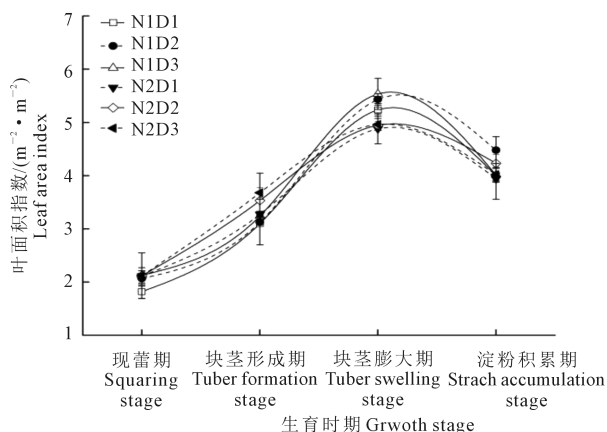


图 2 氮密互作对马铃薯叶面积指数的影响

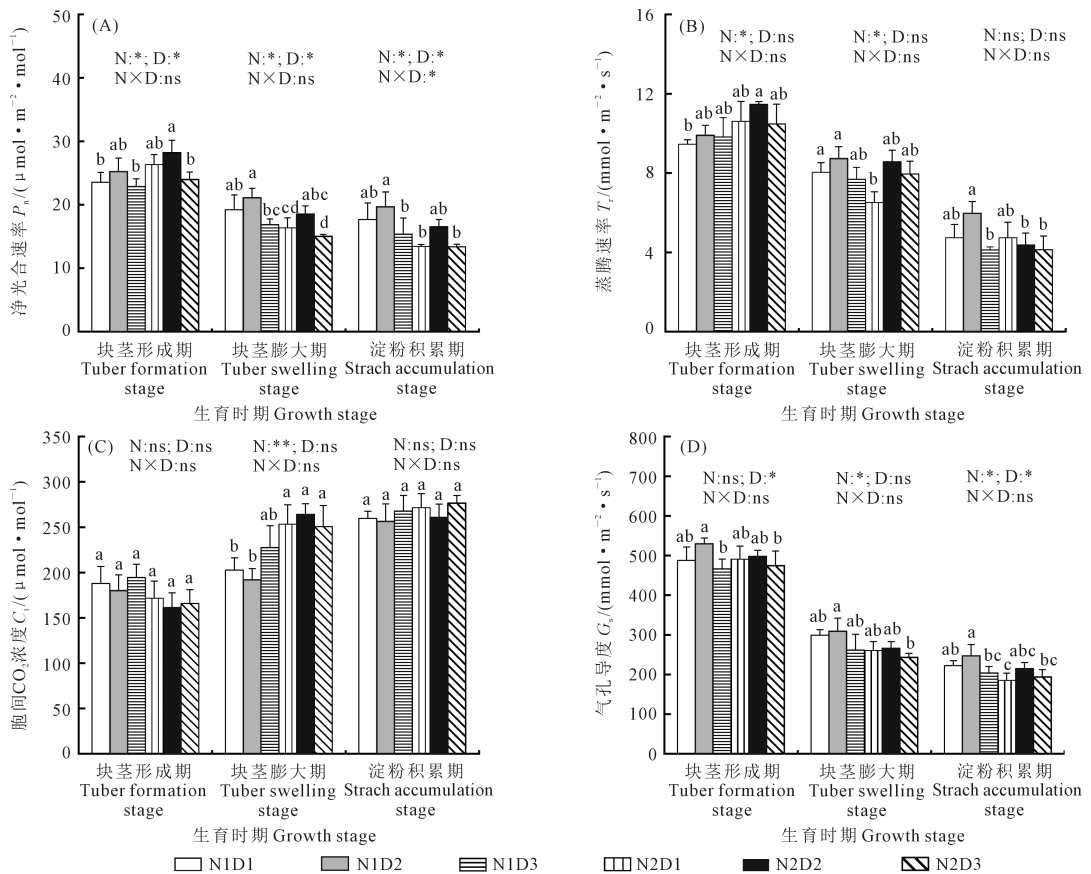
Fig.2 Effects of nitrogen-dense interaction on potato leaf area index

密度下净光合速率均表现为 N2>N1, N2D2 处理净光合速率较 N2D3 处理显著提高 17.66%, N2D2 与 N1D2 处理间差异不显著; 在块茎膨大期, N1D2 较 N1D3 处理净光合速率显著提高 25.37%, N2D2 较 N2D3 处理显著提高 23.53%, N1D1 较 N2D1 处理显著提高 17.24%, N2D2 与 N1D2 处理间差异不显著; 在淀粉积累期, N1D2 较 N1D3 处理净光合速率显著提高 28.33%, 相同种植密度下各处理间差异不显著。施氮量和种植密度对马铃薯净光合速率均有显著影响, 两因素在淀粉积累期表现出显著互作效应。

如图 3B 所示, 在同一种植密度下, 块茎形成期的叶片蒸腾速率表现为 N2>N1, 块茎膨大期及淀粉积累期则表现为 N1>N2。在块茎膨大期, N1D1 处理蒸腾速率较 N2D1 处理显著提高 23.39%; 在淀粉积累期, N1D2 处理蒸腾速率较 N1D3 和 N2D2 处理分别显著提高 44.54% 和 36.07%。施氮量在块茎形成期和块茎膨大期对马铃薯蒸腾速率有显著影响, 种植密度及两因素互作均未对蒸腾速率产生显著影响。

如图 3C 所示, 马铃薯胞间 CO₂ 浓度基本与光合速率呈相反的生育期变化趋势, 块茎形成期最小, 块茎膨大期和淀粉积累期相同种植密度下胞间 CO₂ 浓度均表现为 N2>N1。在块茎膨大期, N1D1 处理胞间 CO₂ 浓度较 N2D1 处理显著降低 22.45%, N1D2 较 N2D2 处理显著降低 15.68%; 在淀粉积累期, 各处理间胞间 CO₂ 浓度无显著差异。施氮量在块茎膨大期对马铃薯胞间 CO₂ 浓度有极显著影响, 种植密度及两因素互作在各生育时期均未产生显著影响。

如图 3D 所示, 马铃薯气孔导度随生育期推进呈降低趋势, 各时期均为 N1D2 处理最大。在块茎形成期, N1D2 处理气孔导度较 N1D3 处理显著提高 13.59%; 在块茎膨大期, 相同施氮量或相同种植密度下处理间差异不显著; 在淀粉积累期, N1D2 处理气孔导度较 N1D3 处理显著提高 21.33%, N1D1 较 N2D1 处理显著提高 20.01%。施氮量在块茎膨大期和淀粉积累期对马铃薯气孔导度有显著影响, 种植密度在块茎形成期和淀粉积累期影响显著, 两因素在各生育时期均无显著互作效应。



注: 同生育时期不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); * 和 ** 分别表示差异显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$), ns 表示差异不显著 ($P > 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters during the same growth stage indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). * indicates significant differences ($P < 0.05$), ** indicates extremely significant differences ($P < 0.01$), ns indicates no significant differences ($P > 0.05$). The same below.

图 3 氮密互作对马铃薯光合参数的影响

Fig.3 Effects of nitrogen-dense interaction on photosynthetic parameters of potato

2.3 氮密互作下马铃薯 Rubisco 活性的变化

随着生育时期的推进,马铃薯 Rubisco 活性呈降低趋势,各处理均为块茎形成期最高(图 4)。在块茎膨大期,相同施氮量下 Rubisco 活性均表现为 D2>D1>D3,相同种植密度下表现为 N1>N2,N1D2 处理 Rubisco 活性较 N1D3 处理显著提高 13.48%,N1D1 较 N2D1 处理显著提高 11.75%,N1D2 较 N2D2 处理提高 7.13%,N2D2 较 N2D1 和 N2D3 处理分别显著提高 9.37%和 10.01%;在块茎形成期和淀粉积累期,各处理间 Rubisco 活性均无显著差异。施氮量和种植密度在块茎膨大期对马铃薯叶片 Rubisco 活性有显著影响,两因素在各生育时期均无显著的互作效应。

2.4 氮密互作下马铃薯干物质积累的变化

马铃薯地上部干物质质量随生育期推进表现为先上升后下降的趋势,最高值出现在淀粉积累期(图 5A);相同施氮量下(块茎形成期 N1 水平和块

茎膨大期 N2 水平除外),各时期地上部干物质质量均为 D2 最大。在块茎形成期,N2D2 处理地上部干物质质量较 N2D3 处理显著提高 20.40%,N2D2 较 N1D2 处理显著提高 33.06%;在块茎膨大期,N1D2 较 N2D2 处理显著提高 20.10%,N1D3 较 N2D3 处理显著提高 24.53%;在淀粉积累期,N1D2 处理地上部干物质质量较 N1D1 和 N1D3 处理分别显著提高 14.66%和 23.16%,N2D2 较 N2D1 和 N2D3 处理分别显著提高 9.93%和 17.16%,N1D2 较 N2D2 处理提高 8.82%;在成熟期,N1D2 处理地上部干物质质量较 N1D1 和 N1D3 处理分别显著提高 14.81%和 24.24%,N2D2 较 N2D1 和 N2D3 处理分别显著提高 20.88%和 25.58%。

块茎膨大期~成熟期马铃薯块茎干物质质量呈递增趋势,其中淀粉积累期的增长速度最快;各时期相同施氮量下块茎干物质质量表现为 D2>D1>D3,相同种植密度下表现为 N1>N2(图 5B),均为 N1D2 处理最大。在块茎膨大期,N1D2 处理块茎干物质质量较 N1D1 和 N1D3 处理分别显著提高 25.80%和 53.01%,N1D1 较 N2D1 处理显著提高 57.36%,N1D2 较 N2D2 处理显著提高 55.45%;在淀粉积累期,N1D2 处理块茎干物质质量较 N1D1 和 N1D3 处理分别显著提高 17.96%和 25.85%,N2D2 较 N2D3 处理提高 24.27%,N1D2 较 N2D2 处理显著提高 20.82%;在成熟期,N1D2 较 N1D3 处理块茎干物质质量显著提高 15.34%,N2D2 较 N2D1 和 N2D3 处理分别显著提高 18.44%和 32.53%。

由表 1 可知,施氮量对马铃薯干物质积累的显著影响表现在生育前期(块茎形成期和块茎膨大期),种植密度则在生育后期(淀粉积累期和成熟期)对其影响极显著,氮密互作效应仅在淀粉积累期表现出显著影响。

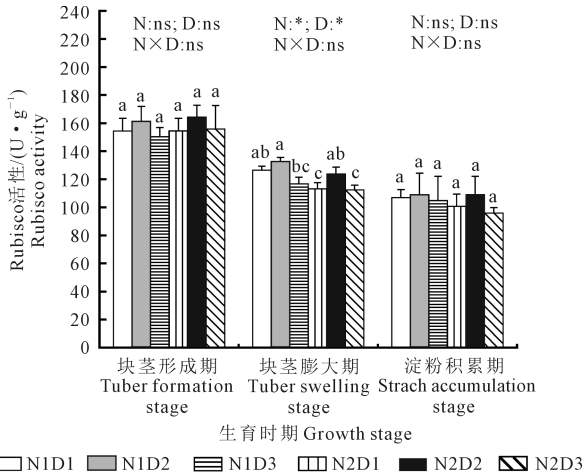


图 4 2023 年氮密互作对马铃薯 Rubisco 活性的影响

Fig.4 Effects of nitrogen-dense interaction on Rubisco activity of potato in 2023

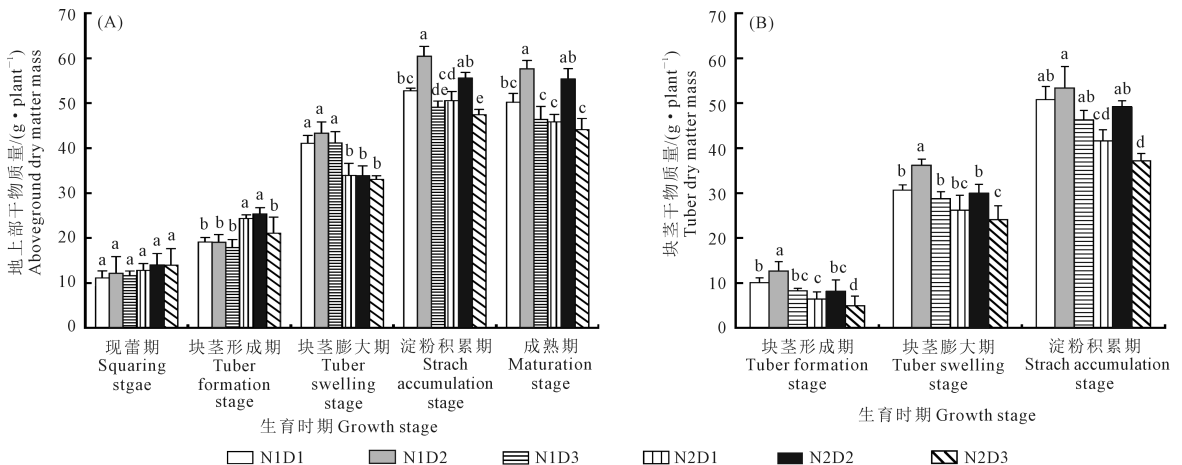


图 5 氮密互作对马铃薯地上部和块茎干物质质量的影响

Fig.5 Effects of nitrogen-dense interaction on shoot and tuber dry mass of potato

2.5 氮密互作对马铃薯产量及产量构成因素的影响

由表 2 可知,2022 年和 2023 年,相同种植密度下 N1 处理马铃薯单株结薯数均高于 N2 处理,相同施氮量下单株结薯数随种植密度的增加呈递减趋势。2022 年,N1D1、N1D2 和 N1D3 处理单株结薯数较 N2 下相应密度处理分别显著增加 16.47%、10.55%和 32.43%;相同施氮量下,N1D1 和 N1D2 分别较 N1D3 处理显著提高 9.86%和 4.54%,N2D1 较 N2D2 和 N2D3 处理分别显著提高3.36%和 29.43%,N2D2 较 N2D3 处理显著提高 25.23%。2023 年,N1D1、N1D2 和 N1D3 单株结薯数较 N2 处理下相应密度处理分别显著增加20.30%、26.07%和 37.25%;相同施氮量下,N1D1 较 N1D3 处理显著提高16.12%,N2D1 较 N2D3 处理显著提高 36.31%。

相同种植密度下两年单薯质量均表现为 N2>N1,相同施氮量下单薯质量随种植密度的增加呈递增趋势。2022 年,N1D2 和 N1D3 单薯质量分别较 N1D1 处理显著提高 12.35%和 16.96%,N2 水平下

各处理间差异未达显著水平;N2 较 N1 水平下各处理单薯质量显著提高 19.10%~32.67%。2023 年,N1D2 和 N1D3 单薯质量分别较 N1D1 处理显著提高 11.20%和 13.90%,N2 水平下各处理间差异不显著;N2 较 N1 水平下各处理单薯质量显著提高 22.76%~32.04%。

施氮量和种植密度对两年马铃薯产量均有显著或极显著影响,二者交互效应对 2022 年马铃薯产量影响显著;相同种植密度下两年产量均表现为 N1>N2,相同施氮量下产量随种植密度的增加呈先增后降的趋势(表 2)。2022 年,N1D1 处理产量较 N2D1 处理显著提高 27.15%,N1D2 较 N2D2 处理显著提高 15.75%;2023 年,N1D2 和 N1D3 较 N1D1 处理产量显著提高 22.55%~27.60%,N2D2 和 N2D3 较 N2D1 处理显著提高 20.79%~19.58%,N1D2 较 N2D2 处理显著提高 7.18%。两年产量均为 N1D2 处理最高,分别为 14 155.84 kg·hm⁻²和16 555.05 kg·hm⁻²,说明在施氮量为 200 kg·hm⁻²、种植密度为 5.25 万株·hm⁻²的栽培模式下马铃薯增产效果更优。

表 1 施氮量和种植密度对马铃薯干物质积累影响的方差分析

Table 2 Variance analysis of effects of nitrogen application and planting density on potato dry matter accumulation

变异来源 Source of variation	生育时期 Growth Stage				
	现蕾期 Budding stage	块茎形成期 Tuber formation stage	块茎膨大期 Tuber swelling stage	淀粉积累期 Starch accumulation stage	成熟期 Maturation stage
施氮量 N	ns	**	**	ns	ns
种植密度 D	ns	ns	ns	**	**
N×D	ns	ns	ns	*	ns

注: * 和 ** 分别表示显著 ($P<0.05$) 和极显著差异 ($P<0.01$), ns 表示差异不显著 ($P>0.05$)。下同。

Note: * indicates significant differences ($P<0.05$), ** indicates extremely significant differences ($P<0.01$), ns indicates no significant differences ($P>0.05$). The same below.

表 2 氮密互作对马铃薯块茎产量及产量构成因素的影响

Table 2 Effects of nitrogen-dense interaction on potato tuber yield and yield components

处理 Treatment	2022			2023		
	单株结薯数 Number of potatoes per plant	单薯质量/g Single potato mass	产量/(kg·hm ⁻²) Yield	单株结薯数 Number of potatoes per plant	单薯质量/g Single potato mass	产量/(kg·hm ⁻²) Yield
N1D1	5.02±0.28a	49.81±4.95c	13214.56±417.61ab	5.69±0.32a	51.15±0.91c	12974.50±234.67c
N1D2	4.61±0.31a	55.96±3.49b	14155.84±688.70a	5.32±0.19ab	56.88±0.97b	16555.05±263.60a
N1D3	4.41±0.43b	58.26±1.85b	13336.01±180.77ab	4.90±0.84bc	58.26±1.85b	15900.78±903.41ab
N2D1	4.31±0.16b	66.08±2.71a	10392.85±523.95c	4.73±0.20bc	67.54±6.31a	12787.46±268.35c
N2D2	4.17±0.22c	69.17±3.48a	12229.53±341.66bc	4.22±0.23c	69.84±0.54a	15445.75±444.55b
N2D3	3.33±0.28d	70.52±2.19a	11785.14±485.37bc	3.47±0.35d	71.52±3.23a	15291.23±746.05b
因素 Factor	方差分析 Variance analysis					
施氮量 N	**	**	*	**	**	*
种植密度 D	*	*	**	*	*	**
N×D	ns	ns	*	ns	ns	ns

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

表 3 产量构成因素对产量的直接和间接效应

Table 3 Direct and indirect effects of yield components on yield

产量构成因素 Yield component	与 y 的直接相关系数 Direct correlation coefficient with y	通径系数(直接作用) Diameter coefficient (Direct action)	间接通径系数 Indirect diameter coefficient	
			X1→y	X2→y
X1	0.627	0.3740		-0.2031
X2	0.615	-0.0261	0.2908	

注: X1: 单株结薯数; X2: 平均单薯质量; y: 产量。

Note: X1: Number of potatoes per plant; X2: Average single potato mass; y: Yield.

由马铃薯块茎产量与各产量构成因素的直接通径系数可知(表 3), 产量构成因素对块茎产量的影响表现为单株结薯数(0.3740) > 单薯质量(-0.0261), 表明单株结薯数对块茎产量的影响高于单薯质量。由块茎产量与各产量构成因素的间接通径系数大小可看出, 单薯质量通过单株结薯数对产量的贡献率最大(0.2908), 氮密互作通过改变马铃薯的结薯数和单薯质量从而提高产量, 其中提高单株结薯数的增产效果更为明显。

2.6 马铃薯光合特性与干物质积累量和块茎产量的相关性分析

由表 4 可知, 净光合速率、气孔导度及干物质积累量在块茎膨大期和淀粉积累期均与块茎产量呈极显著正相关; 叶面积指数在块茎膨大期与块茎产量呈极显著正相关关系; 蒸腾速率及胞间 CO₂ 浓度与块茎产量相关性不显著; Rubisco 活性在马铃薯块茎膨大期与块茎产量呈极显著正相关, 在淀粉积累期与块茎产量呈显著正相关关系。

2.7 氮密互作对马铃薯经济效益的影响

如表 5 所示, 2022—2023 年总投入表现为 N2D3 > N1D3 > N2D2 > N1D2 > N2D1 > N1D1, N2D3 处理最高。相同种植密度下, N1 的马铃薯总收益均大于 N2 处理, N1D2 处理最高, N2D1 处理最低。2022 年 N1D2 较 N1D1 和 N1D3 处理总收益分别增加 135.41 CNY · hm⁻² 和 901.82 CNY · hm⁻², 较 N2D2 和 N2D3 处理分别增加 2 118.95 CNY · hm⁻² 和 2 607.78 CNY · hm⁻²; 2023 年 N1D2 较 N1D1 和 N1D3 处理总收益分别增加 3 938.61 CNY · hm⁻² 和 719.70 CNY · hm⁻², 较 N2D2 处理总收益增加 1 220.23 CNY · hm⁻²。2022 年各处理间净收益表现为 N1D2 > N1D1 > N2D3 > N2D2 > N2D3 > N2D1, 2023 年表现为 N1D2 > N1D3 > N2D2 > N2D3 > N1D1 > N2D1, 两年均为 N1D2 处理最高, 2022 年和 2023 年分别较其他处理提高 5.13% ~ 169.16% 和 21.56% ~ 76.55%。

表 4 不同生育时期马铃薯光合特性和干物质积累量与块茎产量的相关分析

Table 4 Correlation analysis of photosynthetic parameters and dry matter accumulation with tuber yield

指标 Index	生育时期 Growth stage	
	块茎膨大期 Tuber swelling stage	淀粉积累期 Starch accumulation stage
叶面积指数 Leaf area index	0.675 **	0.380
Rubisco 活性 Rubisco activity	0.797 **	0.490 *
净光合速率 Photosynthetic rate	0.742 **	0.661 **
蒸腾速率 Transpiration rate	0.458	0.459
胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration	0.174	-0.128
气孔导度 Stomatal conductance	0.658 **	0.776 **
干物质积累量 Dry matter accumulation	0.814 **	0.618 **

3 讨论

3.1 马铃薯光合生理特性对氮密互作的响应

光合作用作为植物最基本的生命活动, 是植物合成有机物质和获取能量的根本来源^[14-15]。在植物生长发育过程中, 叶片的叶绿素含量、叶面积指数以及 Rubisco 活性和光合器官结构的改变均会影响 CO₂ 的同化速率和光合产物的积累, 最终影响作物产量的形成^[16]。

建立高光效群体是作物高产的核心, 叶面积指数是反映群体生长状况的重要指标, 其大小与产量密切相关^[17]。Dyson 等^[18]研究表明, 施氮增加了群体叶面积指数, 增强了光合作用, 并可保持叶片功能期。本研究也发现, 马铃薯生育前期的叶面积指数均表现为 N2 > N1。增加种植密度可通过提高叶面积指数充分利用光照、空间和地力资源, 增加植株光合效率和光合产物积累, 提高产量和资源利用率^[19]。Zhang 等^[17]研究发现, 马铃薯叶面积指数随种植密度的增大而增大。本研究也表明, 在相同施

表 5 不同处理下马铃薯经济效益分析/(CNY·hm⁻²)

Table 5 Analysis of economic benefits of potatoes under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	总投入 Total input				总收益 Total revenue	净收益 Net proceeds
		肥料 Fertilizer	种薯 Seed	雇工 Hire hand	合计 Total		
2022	N1D1	4100	1875	3000	8975	14536.02±459.37b	5561.02±459.37a
	N1D2	4100	2625	3000	9725	15571.43±757.57a	5846.43±757.57a
	N1D3	4100	3375	3000	10475	14669.61±198.85ab	4194.61±198.85b
	N2D1	4385	1875	3000	9260	11432.13±576.35d	2172.13±576.35c
	N2D2	4385	2625	3000	10010	13452.48±375.83c	3442.48±375.83b
	N2D3	4385	3375	3000	10760	12963.65±533.91c	2203.65±533.91c
2023	N1D1	4100	1875	3000	8975	14271.95±269.99c	5296.95±269.99c
	N1D2	4100	2625	3000	9725	18210.56±191.18a	8485.56±191.18a
	N1D3	4100	3375	3000	10475	17490.86±535.74ab	7015.86±535.74b
	N2D1	4385	1875	3000	9260	14066.11±960.06c	4806.11±960.06d
	N2D2	4385	2625	3000	10010	16990.33±206.30b	6980.33±206.30b
	N2D3	4385	3375	3000	10760	16820.35±778.43b	6060.35±778.43bc

注:马铃薯收购价格为 1.1 CNY·kg⁻¹。

Note: The purchase price of potatoes is 1.1 CNY·kg⁻¹.

氮量下,叶面积指数随种植密度的增加而增大,表现为 D3>D2>D1;但在淀粉积累期,N1D2 处理的叶面积指数高于其他处理,可能是高氮高密处理下地上部植株较大,在马铃薯生育后期叶片相互遮挡,导致部分叶片凋落^[19],降低了叶面积指数。本研究中,块茎膨大期的叶面积指数与产量的相关性更强,而淀粉积累期的叶面积指数与产量相关性不显著。可能是因为生育前期是马铃薯地上器官迅速建成的时期,此时期叶面积指数的增加对全株干物质积累量的贡献很大;而生育后期,叶片开始枯萎凋落,叶面积指数降低,对产量的影响也降低^[19]。

Rubisco 是光合作用的关键酶,叶片氮含量可影响光合色素含量和 Rubisco 活性^[20]。赵宏伟等^[21]研究表明,氮肥施用量对玉米 Rubisco 活性影响明显,减少施氮量使该酶活性显著降低,还会使其峰值提前出现,增量施氮则导致生育后期 Rubisco 活性下降。本研究结果与其相似,相同种植密度下,马铃薯生育前期叶片中 Rubisco 活性表现为 N2>N1,生育后期则表现为 N1>N2,可能是密度因素的中和作用。Rubisco 是碳同化过程中的关键酶,是决定植物在逆境中能否维持较高净光合速率的关键因子。有研究认为,黄瓜叶片的 Rubisco 活性在弱光胁迫下显著降低,导致其净光合速率较低^[20]。本研究中,相同施氮量下 Rubisco 活性表现为 D2>D1>D3,马铃薯块茎膨大期的 Rubisco 活性与块茎产量呈极显著正相关关系,淀粉积累期的 Rubisco 活性与块茎产量显著正相关。

光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度是衡量光合作用强弱的重要生理指标。本试验结

果表明,马铃薯各处理的叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均随着生育期的推移呈下降趋势,其中 N1D2 和 N2D2 处理最大。前人研究表明,马铃薯块茎形成期净光合速率随施氮水平提高而逐渐提高^[22]。本研究结果与其相似,且块茎膨大期~淀粉积累期高施氮量处理的净光合速率下降幅度大于低施氮量处理。本研究还发现,马铃薯叶片胞间 CO₂ 浓度随生育期推进呈升高趋势,块茎形成期 N1 处理胞间 CO₂ 浓度高于 N2 处理,块茎膨大期~淀粉积累期 N2 处理下胞间 CO₂ 浓度上升幅度更大,说明施氮过高不利于生育后期马铃薯对胞间 CO₂ 利用能力的保持。相关分析表明,块茎膨大期~淀粉积累期的净光合速率与产量的相关性极显著,说明此阶段较高的光合速率是块茎干物质积累量的主要来源。

3.2 氮密互作下马铃薯光合特性对干物质质量与产量的调控效应

干物质积累是作物产量的基础,干物质在各器官间的分配是制约产量的关键因素。旱地作物产量的 90%~95% 来自光合产物,而光合产物的积累量取决于叶面积大小、叶片的光合能力及光合作用的持续期^[23]。有研究指出,在水肥良好的条件下,理论上较高的光合作用应有较高的作物产量^[24]。本研究结果表明,现蕾期~淀粉积累期马铃薯全株干物质积累量呈持续上升趋势,成熟期有所下降;现蕾期~块茎形成期植株干物质积累量表现为 N2>N1,块茎膨大期~成熟期相同种植密度下均表现为 N1>N2,且在 N1 水平下均为 N1D2 处理最大。张延磊^[25]研究表明,马铃薯产量与种植密度呈开口向下

的抛物线关系。本研究也表明,各施氮量下种植密度对马铃薯干物质积累量的影响均表现为 $D2>D1>D3$ 。有研究表明,适量氮肥可促进茎叶生长,提高生育后期光合性能,显著提高块茎的膨大速率,从而增加马铃薯产量,但氮肥施用过量会引起植株徒长,易感染病害,结薯延迟,导致块茎干物质质量降低^[26]。本研究也表明,相同种植密度下块茎膨大期~淀粉积累期马铃薯块茎干物质积累量均表现为 $N1>N2$,相同施氮量下表现为 $D2>D1>D3$ 。本研究还发现,相同种植密度下,现蕾期~块茎形成期的植株干物质积累量及块茎膨大期~淀粉积累期的马铃薯叶面积指数、Rubisco 活性、光合参数和地上部干物质质量均表现为 $N1>N2$,而块茎膨大期前叶面积指数、Rubisco 活性、光合参数和地上部干物质质量均表现为 $N2>N1$ 。这可能是由于过量氮肥导致马铃薯生长前期茎、叶干物质积累过剩,降低了光合有机物开花后向块茎的转运量和转移率,使生育后期块茎干物质积累量大幅下降^[27],而块茎膨大期~淀粉积累期的干物质积累量与产量呈极显著正相关关系(表 4),最终影响产量的形成。

干物质是作物光合产物的表现形式,干物质积累量与产量呈正相关关系^[28]。氮肥对作物产量形成的贡献率可达 45%^[29]。有研究表明,马铃薯产量随施氮量的增加呈抛物线变化趋势,适量增施氮肥可有效提高马铃薯产量^[30]。本研究发现,在相同种植密度下,马铃薯产量均表现为 $N1>N2$,施氮量对单株结薯数有显著影响;通径分析结果也表明,单株结薯数对马铃薯产量的影响最大。由于植物对生长资源的竞争,栽培密度过高会引起资源分配的压力,导致作物产量差异大^[31]。张伟^[32]研究表明,栽培密度对马铃薯产量有显著影响,单位面积块茎数随播种密度的增加而增加,但块茎重及商品薯率有所降低。而本研究发现,马铃薯单株结薯数随种植密度的增大而减小,可能是因为密度范围过大导致群体增加,影响个体生长。与崔雯^[33]研究结果相同,即马铃薯单薯质量随种植密度的增大而增大。张中宁等^[34]研究发现,随栽培密度的增大,马铃薯产量呈先上升后下降的趋势。本研究也发现,相同施氮量下马铃薯产量表现为 $D2>D1>D3$,说明适当增加栽培密度是提高产量直接有效的途径。本研究中,马铃薯产量为 $N1D2$ 处理最大,且该处理块茎膨大期~淀粉积累期的净光合速率及植株干物质质量最大,此阶段的净光合速率和植株干物质质量均与产量有极显著相关性,也证明了此结果。前人研究表明,种植密度与施氮互作对作物产量有显著影

响^[35]。但本研究发现,2023 年种植密度与施氮量互作对马铃薯产量无显著影响,其原因可能与区域气候和种植技术等因素有关。

4 结 论

高氮高密 ($300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} + 6.75 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$) 有利于生育期前期马铃薯叶面积指数升高,低氮中密 ($200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} + 5.25 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$) 有利于马铃薯生育后期净光合速率和 Rubisco 活性的提升以及地上部干物质积累量和块茎干物质积累量的增加。施氮量 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和种植密度 $5.25 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 下,马铃薯块茎膨大期 Rubisco 活性较其他密度处理提高 4.85%~13.48%,块茎膨大期~淀粉积累期叶片净光合速率较其他密度处理在两个时期分别提高 9.96%~25.37% 和 11.47%~28.33%,块茎产量和净收益较其他处理分别提高 4.11%~29.46% 和 21.56%~76.55%。因此,在陇中旱农区‘陇薯 16 号’生产中,施氮量 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和种植密度 $5.25 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 可保证马铃薯产量,同时提高经济效益。

参 考 文 献:

- [1] 达存莹,岳云,贾秀苹.甘肃省马铃薯产业发展现状及主粮化发展分析[J].中国农业资源与区划,2016,37(3):38-42.
DA C Y, YUE Y, JIA X P. Analysis of the development status of potato industry and the development of staple food in Gansu Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016,37(3):38-42.
- [2] 王效瑜,王收良,吴林科,等.密度、肥料对马铃薯不同品种产量与品质的影响[J].北方农业学报,2011,(3):52-53.
WANG X Y, WANG S L, WU L K, et al. Effects of density and fertilizer on yield and quality of different potato varieties [J]. Journal of Northern Agricultural Sciences, 2011, (3): 52-53.
- [3] 巨晓棠,谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):783-795.
JU X T, GU B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(4): 783-795.
- [4] 魏峭嵘,曹敏建,石瑛,等.施氮水平对不同马铃薯品种生长发育及品质性状的影响[J].沈阳农业大学学报,2017,48(2):152-158.
WEI Q R, CAO M J, SHI Y, et al. Effects of nitrogen fertilizer application rate on growth, development and quality in potato[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(2): 152-158.
- [5] 贺锦红,吴娜,蔡明,等.马铃薯-燕麦间作条件下施氮水平对马铃薯农艺性状及产量品质的影响[J].南方农业,2018,12(27):31-35.
HE J H, WU N, CAI M, et al. Effects of nitrogen application level on agronomic characters, yield and quality of potato under potato-oat intercropping[J]. South China Agriculture, 2018, 12(27): 31-35.
- [6] ALVA L. Potato nitrogen management[J]. Journal of Vegetable Crop Production, 2004, 10(1): 97-132.

- [7] 吉玮蓉, 张吉立, 孙海人, 等. 不同施氮量对马铃薯养分吸收及产量和品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(21): 5158-5160, 5166.
JI W R, ZHANG J L, SUN H R, et al. Nutrient absorption, yield and quality of *Solanum tuberosum* L. under different nitrogen levels[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(21): 5158-5160, 5166.
- [8] 王友生, 岳云, 李效文. 不同肥力水平和种植密度对定西秸秆覆盖马铃薯生产的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(2): 198-203.
WANG Y S, YUE Y, LI X W. Effects of different planting densities and fertilization amounts on straw mulching potato in Dingxi areas[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2019, 28(2): 198-203.
- [9] GAYLER S, WANG E, PRIESACK E, et al. Modeling biomass growth, N-uptake and phenological development of potato crop[J]. Geoderma, 2002, 105(3/4): 367-383.
- [10] 刘喜霞. 不同种植密度对马铃薯产量的影响[J]. 农业科技与信息, 2021, (14): 23-24, 28.
LIU X X. Effects of different planting densities on potato yield[J]. Information of Agricultural Science and Technology, 2021, (14): 23-24, 28.
- [11] 崔佩佩, 丁玉川, 焦晓燕, 等. 氮肥对作物的影响研究进展[J]. 山西农业科学, 2017, 45(4): 663-668.
CUI P P, DING Y C, JIAO X Y, et al. Research advances on effects of nitrogen fertilizer application on crops[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45(4): 663-668.
- [12] 刘淑梅. 甘肃省中部地区马铃薯养分资源投入的调查与分析[J]. 甘肃科技纵横, 2014, 43(2): 4-6.
LIU S M. Investigation and analysis of potato nutrient resource input in central Gansu Province[J]. Gansu Science and Technology, 2014, 43(2): 4-6.
- [13] 王晓霞. 陇中马铃薯生产对粮食安全的意义[J]. 甘肃农业, 2014, (20): 95-96.
WANG X X. Significance of potato production on food security in Longzhong Province[J]. Gansu Nongye, 2014, (20): 95-96.
- [14] 王红丽, 张绪成, 于显枫, 等. 黑色地膜覆盖的土壤水热效应及其对马铃薯产量的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5215-5226.
WANG H L, ZHANG X C, YU X F, et al. Effect of using black plastic film as mulch on soil temperature and moisture and potato yield[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): 5215-5226.
- [15] FAN Y L, LIU J M, ZHAO J T, et al. Effects of delayed irrigation during the jointing stage on the photosynthetic characteristics and yield of winter wheat under different planting patterns[J]. Agricultural Water Management, 2019, 221: 371-376.
- [16] 杨晓璐, 杨航, 王季春, 等. 马铃薯行株距比对光合特性及产量品质的影响[J]. 园艺学报, 2018, 45(8): 1563-1574.
YANG X L, YANG H, WANG J C, et al. Effects of widening row spacing and shortening plant spacing on the photosynthetic characteristics, yield and quality of potato[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2018, 45(8): 1563-1574.
- [17] ZHANG L, WANG G, ZHANG E, et al. Effect of phosphorus application and strip-intercropping on yield and some wheat-grain components in a wheat/maize/potato intercropping system[J]. African Journal of Agricultural Research, 2011, 6(27): 5860-5869.
- [18] DYSON P W, WATSON D J. An analysis of the effects of nutrient supply on the growth of potato crops[J]. Annals of Applied Biology, 2010, 69(1): 47-63.
- [19] 柳燕兰, 郭贤仕, 张绪成, 等. 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[J]. 作物学报, 2021, 47(2): 320-331.
LIU Y L, GUO X S, ZHANG X C, et al. Effects of planting density and fertilization on dry matter accumulation, yield and water-fertilizer utilization of dryland potato[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(2): 320-331.
- [20] 姜振升, 刘培培, 王美玲, 等. 黄瓜幼苗 Rubisco 与 Rubisco 活化酶对光强的响应[J]. 西北农业学报, 2011, 20(9): 95-99.
JIANG Z S, LIU P P, WANG M L, et al. Response of Rubisco and Rubisco activase in cucumber seedlings to light intensity[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2011, 20(9): 95-99.
- [21] 赵宏伟, 邹德堂, 付春艳. 氮肥施用量对春玉米光合作用关键酶活性和光合速率的影响[J]. 玉米科学, 2006, 14(3): 161-164.
ZHAO H W, ZOU D T, FU C Y. Effect of application levels of nitrogen fertilizer on activity of key enzyme in photosynthesis and Pn of spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(3): 161-164.
- [22] 朱启林, 向蕊, 汤利, 等. 间作条件下施氮量对马铃薯光合特性的调控作用[J]. 生态学杂志, 2018, 37(5): 1391-1397.
ZHU Q L, XIANG R, TANG L, et al. The effects of nitrogen application rate on photosynthetic characteristics of potato under intercropping[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(5): 1391-1397.
- [23] 林荣呈, 杨文强, 王柏臣, 等. 光合作用研究若干前沿进展与展望[J]. 中国科学(生命科学), 2021, 51(10): 1376-1384.
LIN R C, YANG W Q, WANG B C, et al. Advances and perspectives in several areas of photosynthesis research[J]. Science in China(Series C), 2021, 51(10): 1376-1384.
- [24] 祝海竣, 唐舟, 石爱龙, 等. 灌溉模式和有机肥配施对水稻产量、光合特性和氮肥利用率的影响[J]. 土壤, 2022, 54(4): 700-707.
ZHU H J, TANG Z, SHI A L, et al. Effects of irrigation patterns and combined application of organic fertilizer on rice yield, photosynthetic characteristics and nitrogen use efficiency[J]. Soils, 2022, 54(4): 700-707.
- [25] 张延磊. 不同种植密度对马铃薯产量形成的影响[J]. 新疆农垦科技, 2012, (2): 7-9.
ZHANG Y L. Effect of different planting density on potato yield formation[J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2012, (2): 7-9.
- [26] 夏更寿, 郭志平. 东农 303 马铃薯高产施肥效果的研究[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2006, 24(2): 165-167, 176.
XIA G S, GUO Z P. Research on fertilization effects of high production of "Dong Nong 303" potato[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2006, 24(2): 165-167, 176.
- [27] 郑顺林, 李国培, 杨世民, 等. 施氮量及追肥比例对冬马铃薯生育期及干物质积累的影响[J]. 四川农业大学学报, 2009, 27(3): 270-274.
ZHENG S L, LI G P, YANG S M, et al. Effect of nitrogen level and top dressing proportion on growing stages and dry matter accumulation in winter potato[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2009, 27(3): 270-274.