文章编号:1000-7601(2025)06-0099-11 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.06.10

氮密互作对旱作马铃薯产量和氮肥利用效率的调控及根系作用机制

包小燕,孟浩峰,李玲玲,王春艳,田 鑫,王 鑫,汪维强

(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:为探究旱作马铃薯根系形态与根系活力对施氮量与栽培密度互作的响应及其对产量和氮肥利用效率的影响,筛选适宜陇中旱农区马铃薯生产的施氮量和栽培密度,于 2023—2024 年设置 3 个氮肥梯度(N0:不施氮;N2:纯氮 200 kg·hm^{-2};N3:纯氮 300 kg·hm^{-2})和 3 个栽培密度(D1:3.75 万株·hm^{-2};D2:5.25 万株·hm^{-2};D3:6.75 万株·hm^{-2}),分析施氮量与栽培密度对马铃薯根系形态、根系活力、产量和氮肥利用效率的影响。结果表明:N2D2 处理马铃薯根系形态表现较优,与其他处理相比,其在块茎膨大期和淀粉积累期的根干质量分别显著增加 9.54%~151.15%和 3.89%~134.41%,根表面积分别显著增加 12.73%~65.08%和 7.37%~91.03%;根长和根系投影面积在淀粉积累期分别显著增加 3.89%~134.41%和 8.92%~72.43%;根体积和根系活力在块茎膨大期分别显著增加 13.89%~63.05%和 10.95%~72.46%。N2D2 处理产量和氮肥利用效率最高,与其他处理相比,2023 年和 2024 年产量分别提高 4.11%~150.32%和 3.94%~169.25%,氮肥农学利用率分别显著提高 6.94%~77.59%和 2.74%~108.56%,氮肥偏生产力分别显著提高 4.12%~94.21%和 3.95%~121.55%。综上,施氮 200 kg·hm^{-2}+栽培密度 5.25 万株·hm^{-2}可有效促进马铃薯单株根干质量、根表面积、根体积,增强根系活力,提高根系吸收能力,有利于增加马铃薯单株结薯数,从而提高马铃薯产量和氮肥利用效率,推荐作为陇中旱农区适宜的氮密互作栽培模式。

关键词:马铃薯;氮密互作;根系形态;根系活力;产量;氮肥利用效率

中图分类号:S532;S318 **文献标志码**:A

Regulation of nitrogen-dense interaction on yield and nitrogen fertilizer use efficiency of dryland potatoes and root mechanism

BAO Xiaoyan, MENG Haofeng, LI Lingling, WANG Chunyan, TIAN Xin, WANG Xin, WANG Weiqiang

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

Abstract: This study aimed to explore the response of root morphology and root activity of dryland potatoes to the interactions of nitrogen application and cultivation density and its effect on yield and nitrogen fertilizer use efficiency, and to screen the nitrogen application rate and planting density suitable for potato production in the dryland area of central Gansu. The experiment was conducted during 2023-2024 with three nitrogen gradients (N0: no nitrogen fertilizer; N2: 200 kg·hm^{-2} nitrogen; N3: 300 kg·hm^{-2} nitrogen) and three cultivation densities (D1: 37 500 plants·hm^{-2}; D2: 52 500 plants·hm^{-2}; D3: 67 500 plants·hm^{-2}). The effects of different nitrogen application rates and cultivation densities on root morphology, root activity, yield, and nitrogen use efficiency of potatoes were determined and analyzed. The results showed that the root morphology of potatoes under N2D2 treatment was better than that under other treatments. Compared with other treatments, the root dry weight of potato under N2D2 treatment increased by 9.54%~151.15% and 3.89%~134.41% during tuber swelling and starch accumula-

收稿日期:2024-12-26 **修回日期**:2025-02-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1900700,2022YFD1900300);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项目(GSCS-2022-04);甘肃农业大学公招博士科研启动基金项目(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:包小燕(1999-),女,甘肃定西人,硕士研究生,研究方向为作物栽培生理。E-mail:1954270943@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

tion stages, respectively, and the root surface area increased by 12.73% ~65.08% and 7.37%~91.03%, respectively. The root length and root projection area increased significantly by 3.89%~134.41% and 8.92%~72.43%, respectively, during the starch accumulation period. Root volume and root activity increased significantly by 13.89%~63.05% and 10.95%~72.46%, respectively. The yield and nitrogen use efficiency of N2D2 treatment were the highest. Compared with other treatments, the yield in 2023 and 2024 increased by 4.11%~150.32% and 3.94%~169.25%, respectively. The agronomic efficiency of nitrogen fertilizer increased by 6.94%~77.59% and 2.74%~108.56%, and the partial factor productivity of nitrogen fertilizer increased by 4.12%~94.21% and 3.95%~121.55%, respectively. In summary, the nitrogen application of 200 kg · hm^{-2} and cultivation density of 52 500 plants · hm^{-2} could effectively promote root dry mass, root surface area and root volume of potato per plant, enhance root activity, improve root absorption capacity, increase the number of potato per plant, thereby improving potato yield and nitrogen use efficiency. It is a suitable nitrogen-dense interaction cultivation mode in the rainfed central Gansu Province.

Keywords: potato; nitrogen-dense interaction; root morphological; root activity; yield; nitrogen fertilizer use efficiency

马铃薯营养丰富、产量高,已成为我国继水稻、小麦、玉米之后的第四大主粮作物,广泛种植于全国各地[1]。马铃薯是甘肃省大力发展的特色优势作物之一,具有抗旱、高产、耐瘠薄等优点,需水规律与甘肃中部半干旱区降水格局基本吻合[2]。陇中旱农区是甘肃乃至全国重要的优质马铃薯产区,该区生产的马铃薯块茎大、淀粉含量高,但马铃薯生产过程中存在施肥量不合理和栽培方式不当等问题,严重制约马铃薯高产、优质、高效生产和产业的可持续发展[3]。

在陇中旱农区,影响马铃薯生长、养分吸收和产量的主要养分限制因子是氮[4]。对陇中旱农区马铃薯养分资源投入的研究指出,施氮量适中的农户仅为32.1%,高达67.9%的农户在种植过程中存在施氮量过高或偏低的问题[5]。氮素含量对马铃薯生长有显著影响,施氮量过高会使马铃薯茎叶过度生长,生育期延迟[6],也会导致根系活力降低,不利于产量提高[7];另外,过量的氮肥投入也会增加农业生产成本,降低氮肥利用效率,加剧土壤酸化[8]。施氮量偏低则会导致马铃薯植株营养不足,生长缓慢,不利于马铃薯根的伸长[9]。适宜的施氮量对植株茎叶生长有促进作用,能够延缓植株衰老,延长叶片功能期,提高光合生产率,从而提高产量[10]。在影响马铃薯产量的栽培因子中,密度是决定其产量的关键因素。陇中旱农区马铃薯生产过程中普遍存在品种和栽培密度搭配不合理的情况,导致马铃薯生产潜力降低[3]。密度过高或过低均不利于马铃薯生长发育及块茎产量形成,在高密度条件下,叶片早衰会导致产量降低,且在有限环境空间内,地下根体积较小,根系活力较低[11];在低密度条件下,植株个体表现优异,地上部生长旺盛,但由于个体数量较少从而不利于群体产量提高[12];适宜的栽培密度可通过提高叶面积指数,充分利用光能、空间和地力资源[10],使单位面积上的马铃薯株数和单株结薯数增加[13]。因此,适宜的施氮量和栽培密度是提高马铃薯产量的重要栽培措施。目前有关马铃薯生长发育和产量的研究多以氮肥或栽培密度单一因子为主,且大多集中在植株地上部,较少关注地下部根系对产量形成的调控效应,关于提高马铃薯群体产量的适宜施氮量与栽培密度配置,以及马铃薯根系形态、根系活力、产量和氮肥利用效率对施氮量与栽培密度的响应情况仍有待深入研究。

本研究通过设置不同施氮量和栽培密度处理,分析马铃薯根系形态、根系活力、产量及氮肥利用效率的变化趋势,探究氮密互作对旱作马铃薯根系形态、根系活力、产量和氮肥利用效率的影响,以筛选适宜陇中旱农区马铃薯生产的施氮量和栽培密度,为旱作马铃薯高产高效栽培模式提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2023—2024年在甘肃省定西市李家堡镇甘肃农业大学旱作农业综合实验站(104°36′E,35°35′N)进行,实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。该地区多年平均降水量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。2023—2024 年降水量情况如图 1 所示。试验区土壤为典型黄绵土,土质较绵软,质地均匀,0~30 cm 土层平均土壤容重为 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}。

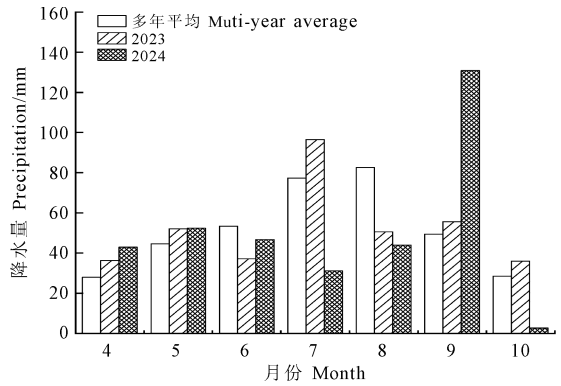


图 1　2023—2024 年试验区马铃薯生育期降水量

Fig.1　Rainfall during potato growth stage of the experimental area from 2023 to 2024

1.2　试验设计

试验采用随机区组设计,共设置 3 个氮肥梯度(N0:不施氮;N2:纯氮 200 kg·hm^{-2};N3:纯氮 300 kg·hm^{-2})和 3 个栽培密度(D1:3.75 万株·hm^{-2};D2:5.25 万株·hm^{-2};D3:6.75 万株·hm^{-2}),共 9 个处理(N0D1、N0D2、N0D3、N2D1、N2D2、N2D3、N3D1、N3D2、N3D3),每个处理 3 次重复,共 27 个小区,小区面积为 40 m^2(10 m×4 m)。各处理纯磷、纯钾施用量分别为 225.0、292.5 kg·hm^{-2},供试氮肥为尿素(N 46%)、磷肥为过磷酸钙(P_2O_5 12%)、钾肥为硫酸钾(K_2O 52%),所有肥料均在播种时人工撒施。供试马铃薯品种为‘陇薯 16 号’,使用覆膜宽垄双行种植模式,2023 年 4 月 30 日播种,10 月 7 日收获;2024 年 4 月 27 日播种,10 月 7 日收获。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　根系形态　分别在马铃薯块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期采用挖掘法[14]取样,每个小区取 3 株长势均匀一致的植株,按行方向在距离植株 20 cm 处挖 50 cm 深的剖面,在尽量不破坏根系的前提下将植株整株挖出,剪下根系先用自来水冲洗 2~3 次,再用蒸馏水冲洗 2 次,用根系扫描仪(Microtek Scan Wizard Pro)对各处理的根系进行扫描,扫描完成后的图像使用根系分析系统(万深 LA-S 根系分析系统)测定根长、根表面积、根系投影面积、根体积、根系平均直径。

1.3.2　根干质量　将测定完形态的马铃薯根系在 80℃烘干至恒重后称重,测量根干质量。

1.3.3　根系活力　分别在马铃薯的块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期,每个小区选取 3 株长势均匀一致的植株,用铁锹挖出马铃薯根系,剪下装入自封袋,立即装入冰盒,采用氯化三苯基四氮唑法测定根系活力[15]。

1.3.4　块茎产量　在马铃薯收获期,分别测定各小区马铃薯块茎产量,每行随机选取 15 株测定马铃薯单株结薯数和单薯质量,并折合计算公顷产量。

1.3.5　氮肥利用效率　氮肥农学利用率和氮肥偏生产力计算如下[16]:

$$\text{氮肥农学利用率}(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})=\frac{(\text{施氮区块茎产量}-\text{不施氮区块茎产量})}{\text{施氮量}}$$

$$\text{氮肥偏生产力}(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})=\frac{\text{施氮区块茎产量}}{\text{施氮量}}$$

1.4　数据分析

使用 Microsoft Excel 2021 对数据进行汇总整理,2023 年和 2024 年根系形态与根系活力变化规律相同,取两年平均值进行分析。采用 SPSS 26.0 统计分析软件进行双因素方差分析与通径分析,运用 Duncan 多重比较进行处理间显著性检验($P<0.05$,$P<0.01$),使用 Origin Pro 2021 作图。

2　结果与分析

2.1　氮密互作对马铃薯根干质量的影响

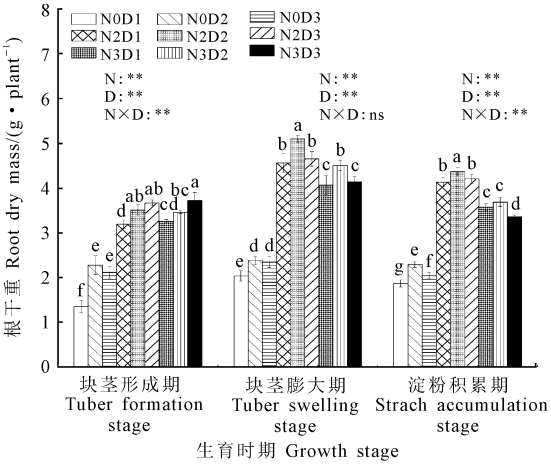
由图 2 可知,施氮量与栽培密度对马铃薯块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期的根干质量有极显著影响,氮密互作对块茎形成期和淀粉积累期的根干质量有极显著影响。根干质量随着生育期的推进呈先升高后降低趋势,在块茎膨大期达到最大值。在块茎形成期同一施氮量下,根干质量表现为 D3>D2>D1,N2D3 较 N2D1 处理根干质量显著增加 14.73%,N3D3 较其他密度处理根干质量显著增加 7.43%~14.04%。在块茎膨大期同一密度下,N2D2 处理根干质量显著高于 N3D2 和 N0D2 处理;N2 施氮量下,N2D2 较其他密度处理根干质量显著增加 9.54%~43.11%。在淀粉积累期同一密度下,N2 施氮量处理根干质量显著高于 N0 和 N3;N2 施氮量下,N2D2 较其他密度处理根干质量显著增加 3.89%~5.65%。

2.2　氮密互作对马铃薯根系形态的影响

2.2.1　氮密互作对单株马铃薯根系形态的影响　由图 3 可知,施氮量和栽培密度对块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期的根长、根表面积、根系投影

面积和根体积均有极显著影响;氮密互作对块茎形成期根长和淀粉积累期的根系投影面积均有极显著影响,对淀粉积累期的根长、块茎膨大期的根表面积和根系投影面积均有显著影响。

如图 3A 所示,随着生育时期的推进,根长呈先增加后降低趋势,在块茎膨大期达到最大值。同一密度下,在块茎形成期与块茎膨大期 N2 施氮量处理的根长均显著高于 N0 和 N3;N2 施氮量下,块茎形成期 N2D3 和 N2D2 较 N2D1 处理根长分别显著增加 26.33%和 20.94%。同一密度下,在淀粉积累期 N2D2 较 N3D2、N2D3 较 N3D3 处理根长分别显著增加 12.06%和 8.12%;N2 施氮量下,N2D2 较其他密度处理根长显著增加 17.79%~22.09%。由图 3B、C 可知,随着生育期的进行,马铃薯根表面积和根系投影面积整体呈先上升后降低趋势,在块茎膨大期达到最大值。在块茎形成期,同一密度下,根表面积与根系投影面积均表现为 N2 施氮量处理显著大于 N0 和 N3。在块茎膨大期,同一密度下,N2D1 较 N3D1、D2D2 较 N3D2 处理根表面积分别显著增加 7.78%和 14.55%,N2D3 较 N3D3 处理根系投影面积显著增大 11.54%;N2 施氮量下,N2D2 较



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。N:施氮量;D:栽培密度;N×D:氮密互作;**:$P<0.01$;*:$P<0.05$;ns:无显著差异。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). N: Nitrogen application rate; D: Cultivation density; N×D: Nitrogen-dense interaction; **: $P<0.01$; *: $P<0.05$; ns: no significant differences. The same below.

图 2 氮密互作对马铃薯根干质量的影响

Fig.2 Effects of nitrogen-dense interaction on root dry mass of potato

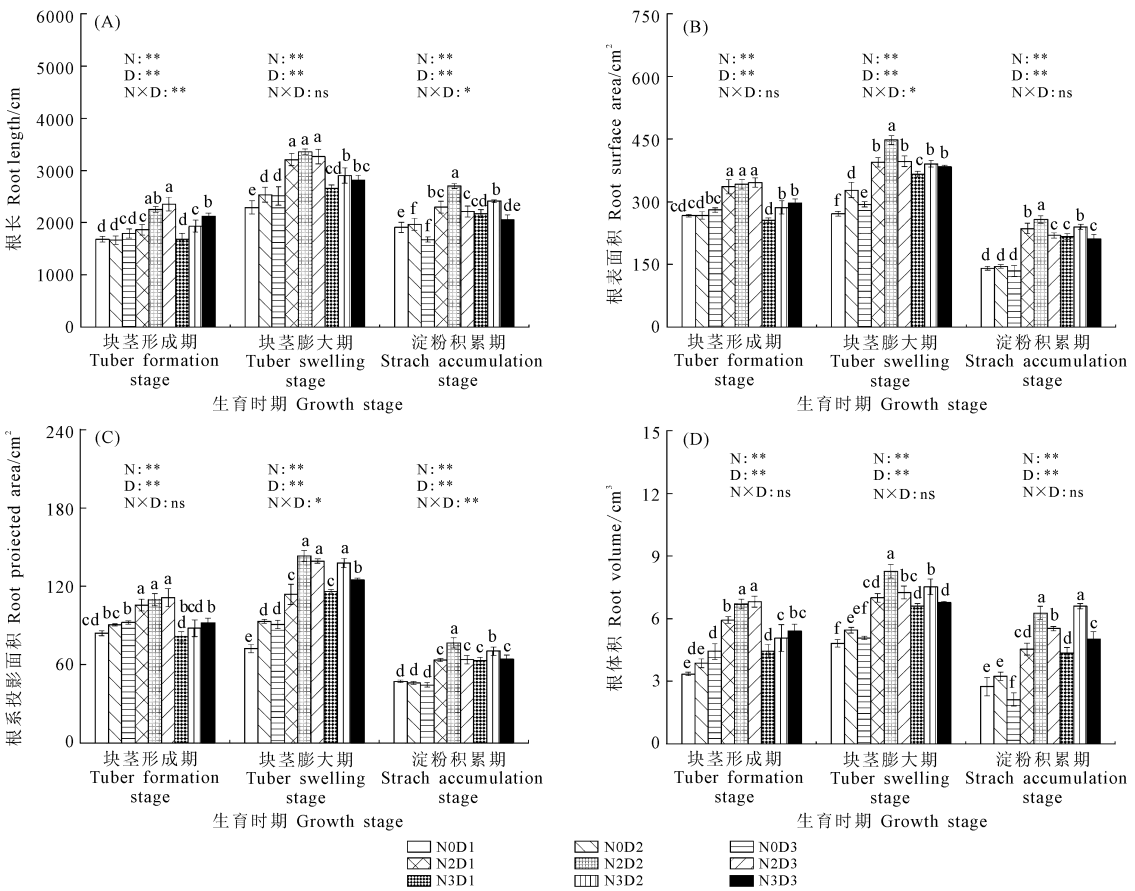


图 3 氮密互作对单株马铃薯根系形态的影响

Fig.3 Effects of nitrogen-dense interaction on root morphology per plant

其他密度处理根表面积显著增加 12.73%~13.47%,N2D2 较 N2D1 处理根系投影面积显著增加 25.78%。在淀粉积累期,同一密度下,根表面积和根系投影面积表现为 N2>N3>N0,N2D2 较 N0D2 和 N3D2 处理根表面积分别显著增加 77.10% 和 7.37%,根系投影面积分别显著增加 66.75% 和 8.92%;N2 施氮量下,N2D2 处理较其他密度处理根表面积和根系投影面积分别显著增加 9.20%~17.42%和 20.06%~20.61%。由图 3D 可知,根体积随生育期的进行呈先增大后降低趋势,在块茎膨大期达到最大值。在块茎形成期,同一密度下,N2 施氮量处理根体积显著大于 N0 和 N3;N2 施氮量下,N2D3 和 N2D2 较 N2D1 处理根体积分别显著增加 14.78%和 12.98%。在块茎膨大期与淀粉积累期,同一密度下,块茎膨大期 N2D2 较 N3D2、N2D3 较 N3D3 处理根体积分别显著增加 9.97%和 7.34%,淀粉积累期 N2D3 较 N3D3 处理根体积显著增加 10.64%;N2 施氮量下,N2D2 处理块茎膨大期与淀粉积累期较其他密度处理根体积分别显著增加 13.89%~18.18%和 13.66%~25.31%。

2.2.2　氮密互作对群体马铃薯根系形态的影响　由图 4 可知,施氮量和栽培密度对块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期的单位面积马铃薯根长、根表面积、根系投影面积及根体积均有极显著影响;氮密互作对块茎形成期的根长有极显著影响,对块茎膨大期和淀粉积累期根表面积、根系投影面积和根体积均有极显著影响。

由图 4A 可知,在块茎膨大期,同一密度下,N2 施氮量处理根长显著大于 N0 与 N3;N2 施氮量下,N2D3 较其他密度处理根长显著增加 34.30%~127.40%。在块茎形成期和淀粉积累期,同一密度下,N2D2 较 N0D2 和 N3D2、N2D3 较 N0D3 和 N3D3 处理根长均显著增大;N2 施氮量下,N2D3 在块茎形成期较其他密度处理根长显著增加 25.02%~83.14%,在淀粉积累期较 N2D1 处理显著增加 73.66%。由图 4B 可知,N2 施氮量下,N2D3 处理在块茎形成期和块茎膨大期较其他密度处理根表面积分别显著增加 30.42%~85.28%和 14.05%~81.18%。在淀粉积累期,同一密度下,N2D2 较 N3D2 处理根表面积显著增加 7.37%;N2 施氮量下,N2D3 较其他密

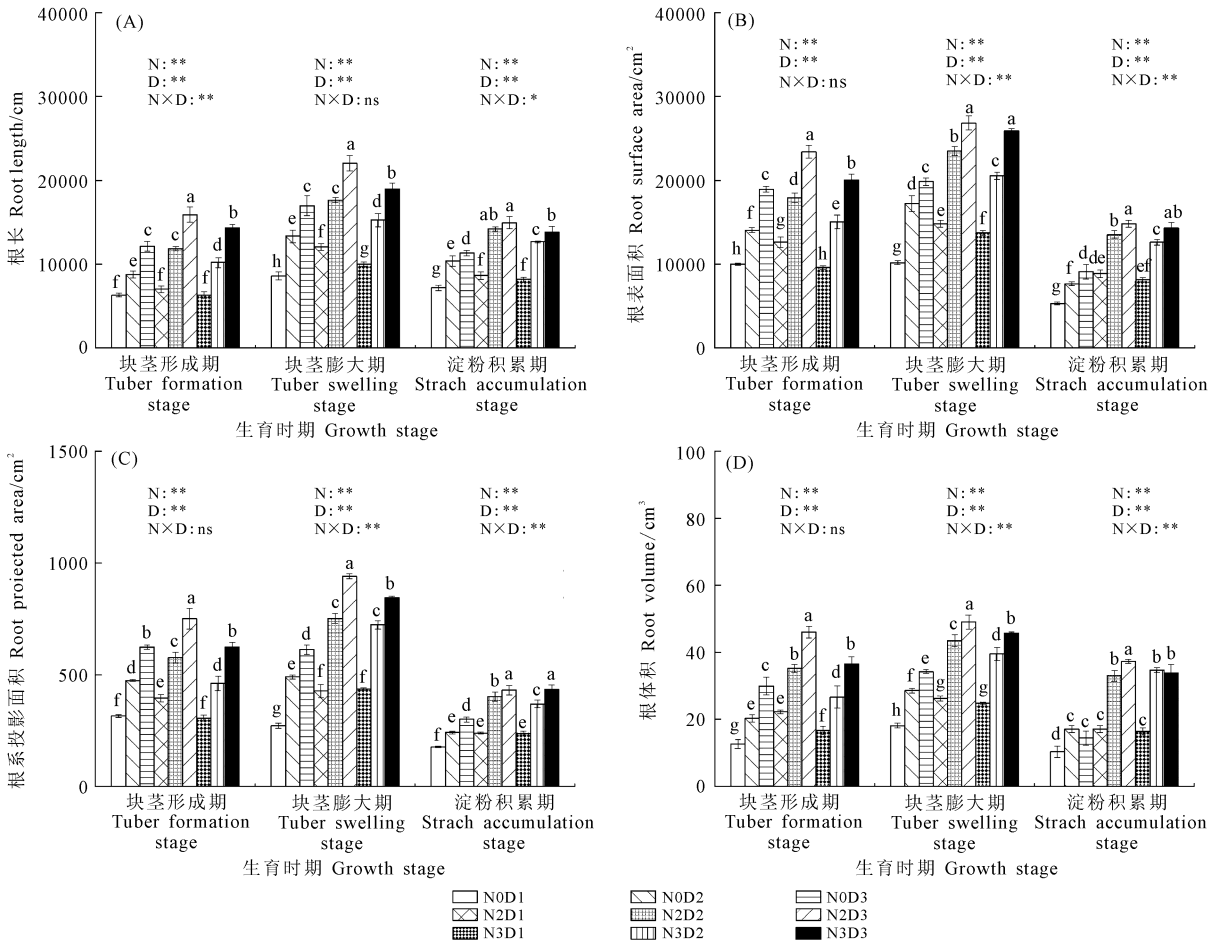


图 4　氮密互作对群体马铃薯根系形态的影响

Fig.4　Effects of nitrogen-dense interaction on root morphology of population potatoes

度处理根表面积显著增加 9.50%～67.41%。由图 4C 可知,在块茎形成期,N2 施氮量下,N2D3 较其他密度处理根系投影面积显著增加 30.33%～89.81%。同一密度下,N2D3 较 N3D3 处理在块茎膨大期显著增加 11.56%,N2D2 较 N3D2 处理在淀粉积累期显著增加 8.92%;N2 施氮量下,N2D3 在块茎膨大期和淀粉积累期较其他密度处理根系投影面积分别显著增加 25.04%～120.28%和 7.09%～80.82%。由图 4D 可知,在块茎形成期,同一密度下,N2 施氮量处理根体积显著大于 N0 与 N3;N2 施氮量下,N2D3 较其他密度处理根体积显著增加 30.87%～106.74%。同一密度下,N2D2 较 N3D2、N2D3 较 N3D3 处理根体积在块茎膨大期分别显著增加 9.97%和 7.34%,N2D3 较 N3D3 处理根体积在淀粉积累期显著增加 10.65%;N2 施氮量下,N2D3 在块茎膨大期和淀粉积累期较其他密度处理根体积分别显著增加 12.91%～86.80%和 13.18%～118.83%。

2.2.3 氮密互作对马铃薯根系平均直径的影响

由图 5 可知,施氮量对块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期根系平均直径均有极显著影响;栽培密度对块茎膨大期和淀粉积累期根系平均直径影响极显著,对块茎形成期根系平均直径有显著影响;氮密互作对三个生育时期根系平均直径均无显著影响。随着马铃薯生育期的进行,根系平均直径呈逐渐增加趋势。在块茎形成期,同一施氮量下,N2D1 较其他密度处理显著增加 7.14%～7.59%,N3D1 较其他密度处理显著增加 6.59%～7.34%。同一密度下,块茎膨大期 N2 施氮量处理根系平均直径显著高于 N3,淀粉积累期 N2D1 较 N3D1、N2D2 较 N3D2 处理根系平均直径分别显著增加 8.96%和 12.82%;N2 施氮量下,N2D1 在块茎膨大期和淀粉积累期较其他密度处理根系平均直径分别显著增加 7.19%～12.29%和7.96%～17.08%。

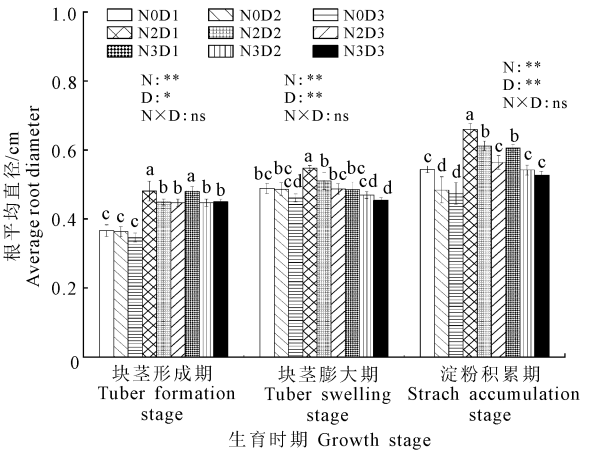


图 5 氮密互作对马铃薯根系平均直径的影响

Fig.5 Effects of nitrogen-dense interaction on root average diameter of potato

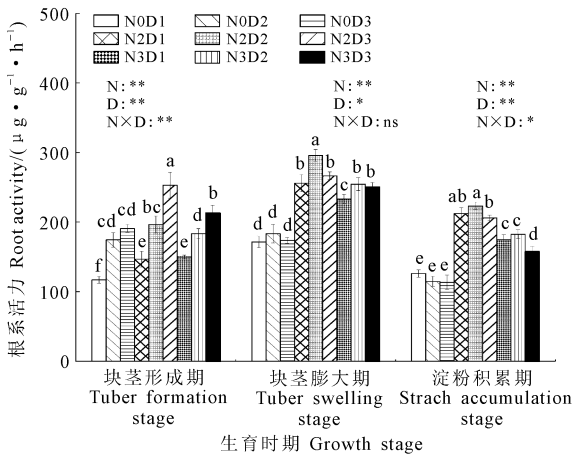


图 6 氮密互作对马铃薯根系活力的影响

Fig.6 Effects of nitrogen-dense interaction on root activity of potato

2.3 氮密互作对马铃薯根系活力的影响

由图 6 可知,施氮量和栽培密度对块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期的根系活力均有极显著影响;氮密互作对块茎形成期根系活力影响极显著,对淀粉积累期的根系活力影响显著。随着生育期的进行,根系活力呈先上升后下降趋势,在块茎膨大期达到峰值。在块茎形成期,同一密度下,N2D2 较 N3D2 处理根系活力显著增加 7.08%,N2D3 较 N0D3 和 N3D3 处理根系活力分别显著增加 32.71%和 18.67%;N2 施氮量下,N2D3 较其他密度处理根系活力显著增加 28.83%～72.72%。在块茎膨大期,同一密度下,N2D1 较 N3D1、N2D2 较 N3D2 处理根系活力分别显著增加 9.67%和 16.12%;N2 施氮量下,N2D2 较其他密度处理根系活力显著增加 10.95%～15.61%。在淀粉积累期,同一密度下,N2 施氮量处理根系活力显著大于 N3 和 N0;N2 施氮量下,N2D2 较 N2D3 处理根系活力显著增加 8.20%。

2.4 氮密互作对马铃薯产量的影响

由表 1 可知,施氮量和栽培密度对 2023 年和 2024 年马铃薯产量均具有极显著影响,氮密互作对 2023 年和 2024 年产量分别有显著和极显著影响。2023 年,N2 施氮量下 3 个密度处理的单株结薯数较 N0 和 N3 施氮量下相应密度处理分别显著提高20.30%～38.78%、26.07%～40.74%和 41.21%～72.54%,2024 年分别显著提高 22.83%～45.16%、28.75%～42.69%和 28.40%～44.22%;N2 施氮量下,2023 年 N2D1 较

N2D3 处理单株结薯数显著增加 16.12%,2024 年 N2D1 较其他密度处理单株结薯数显著提高 3.28%~39.36%。2023 年,N3 施氮量 3 个密度处理的单薯质量较 N0 和 N2 施氮量的 3 个密度处理分别显著提高 32.04~57.03%、22.78%~47.28%和 22.76%~48.44%,2024 年分别显著提高 18.67%~53.94%、15.94%~41.21%和 14.87%~41.53%;N3 施氮量下,两年各密度单薯质量差异均不显著。同一密度下,2023 年 N2D2 较其他施氮处理产量显著提高 7.18%~75.81%,2024 年 N2D2 较 N3D2、N2D3 较 N3D3 处理产量分别显著增加 11.14%和 10.48%;N2 施氮量下,2023 年和 2024 年 N2D2 处理产量均大于 N2D3 处理,且较 N2D1 处理分别显著增加 27.60%和 43.94%。所有处理中 N2D2 产量均表现最高,分别为 16 555.05 kg·hm^{-2}和 19 597.90 kg·hm^{-2}。

2.5　氮密互作对马铃薯氮肥利用效率的影响

由表 2 可知,施氮量对两年氮肥农学利用率和氮肥偏生产力均影响极显著,栽培密度对 2023 年氮肥偏生产力影响极显著,对 2024 年氮肥农学利用率与氮肥偏生产力影响极显著;氮密互作对 2023 年氮肥偏生产力影响显著,对 2024 年氮肥偏生产力影响极显著。同一密度下,两年马铃薯氮肥农学利用率和氮肥偏生产力均表现为 N2>N3。N2 施氮量下,2023 年 N2D2 处理氮肥农学利用率最大,较其余处理增加 6.92%~77.56%,氮肥偏生产力较 N2D1 处理显著增加 27.61%;2024 年,N2D2 较 N2D1 处理氮肥农学利用率显著增加 31.43%,氮肥偏生产力较其他密度处理显著增加 3.95%~43.93%。

表 1　氮密互作对马铃薯产量及产量构成因素的影响

Table 1　Effects of nitrogen-dense interaction on potato yield and yield components

处理 Treatment	2023 单株结薯数 Number of potatoes per plant	2023 单薯质量 Single potato mass/g	2023 产量 Yield /(kg·hm^{-2})	2024 单株结薯数 Number of potatoes per plant	2024 单薯质量 Single potato mass/g	2024 产量 Yield /(kg·hm^{-2})
N0D1	4.10±0.04de	43.01±1.14d	6613.49±245.61e	3.83±0.02f	50.67±1.90e	7278.83±309.75e
N0D2	3.78±0.06de	47.42±0.76c	9416.51±47.38d	3.77±0.04f	56.94±1.69d	11268.39±253.55d
N0D3	2.84±0.06f	48.18±0.06c	9225.78±190.25d	2.77±0.01h	57.54±1.98d	10745.30±385.08d
N2D1	5.69±0.32a	51.15±0.91c	12974.50±234.67c	5.56±0.05a	65.73±2.41c	13615.79±492.93c
N2D2	5.32±0.19ab	56.88±0.97b	16555.05±263.61a	5.38±0.08b	69.34±0.65bc	19597.90±483.90a
N2D3	4.90±0.84b	58.26±1.85b	15900.78±903.41ab	3.99±0.10e	70.89±2.74b	18854.14±576.96a
N3D1	4.73±0.20bc	67.54±6.31a	12787.46±268.35c	4.54±0.03c	78.75±1.92a	13268.25±233.41c
N3D2	4.22±0.23cd	69.84±0.54a	15445.75±444.54b	4.18±0.07d	80.40±2.00a	17633.74±544.69b
N3D3	3.47±0.35e	71.52±3.23a	15291.23±746.05b	3.11±0.10g	81.43±3.28a	17066.13±566.69b
方差分析 Analysis of variance						
N	**	**	**	**	**	**
D	**	**	**	**	**	**
N×D	ns	ns	*	**	ns	**

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。**:P<0.01;*:P<0.05;ns:无显著差异;N:施氮量;D:栽培密度;N×D:氮密互作。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments (P<0.05). **: P<0.01; *: P<0.05; ns: no significant differences. N: Nitrogen application rate; D: Cultivation density; N×D: Nitrogen-dense interaction. The same below.

表 2　氮密互作对马铃薯氮肥利用效率的影响/(kg·kg^{-1})

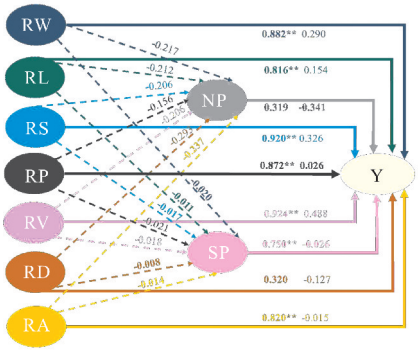
Table 2　Effects of nitrogen-dense interaction on water and nitrogen use efficiency of potato

处理 Treatment	2023 氮肥农学利用率 Nitrogen fertilizer agronomic efficiency	2023 氮肥偏生产力 Partial productivity of nitrogen fertilizer	2024 氮肥农学利用率 Nitrogen fertilizer agronomic efficiency	2024 氮肥偏生产力 Partial productivity of nitrogen fertilizer
N2D1	31.81±2.32a	64.87±1.17b	31.69±3.59b	68.08±2.46c
N2D2	35.69±1.55a	82.78±1.32a	41.65±0.40a	97.99±1.42a
N2D3	33.38±3.63a	79.50±4.52a	40.54±2.08a	94.27±0.89b
N3D1	20.58±1.71b	42.62±0.89d	19.97±2.32c	44.23±2.73e
N3D2	20.10±1.62b	51.49±1.48c	21.22±0.26c	58.78±0.62d
N3D3	20.22±2.81b	50.97±2.49c	21.07±2.16c	56.89±0.93d
方差分析 Analysis of variance				
N	**	**	**	**
D	ns	**	**	**
N×D	ns	*	ns	**

2.6 马铃薯根系形态和活力与产量及氮肥利用效率的通径分析

由图 7 可知,不同施氮量和栽培密度下,马铃薯根干质量、根长、根表面积、根系投影面积、根体积、根系活力与产量呈极显著正相关关系,根系平均直径与产量呈正相关关系。马铃薯根干质量、根系形态、根系活力和产量构成因素对马铃薯产量的直接贡献程度(直接通径系数绝对值)表现为:根体积(0.488)>单株结薯数(−0.341)>根表面积(0.326)>根干重(0.290)>根长(0.154)>根系平均直径(−0.127)>单薯质量(−0.026)>根系投影面积(−0.025)>根系活力(−0.015);通过马铃薯产量与各指标的间接通径系数可知,根干质量(−0.217)、根长(−0.212)、根表面积(−0.206)、根系投影面积(−0.156)、根体积(−0.206)、根系平均直径(−0.293)和根系活力(−0.237)通过影响单株结薯数对产量的贡献程度均大于影响单薯质量(−0.020、−0.011、−0.017、−0.021、−0.008 和−0.014)对产量的贡献程度。因此,马铃薯根系主要通过影响根干质量、根表面积和根体积以促进马铃薯产量的增加。

由图 8 可知,不同施氮量和栽培密度下,根干质量、根长、根表面积、根体积、根系活力与氮肥农学利用率和氮肥偏生产力均呈极显著正相关关系。马铃薯根干质量、根系形态、根系活力和产量构成因素对氮肥农学利用率的直接贡献程度表现为:根系活力(0.664)>根表面积(0.335)>根系投影面积(−0.172)>根干质量(−0.125)>根长(0.122)>根系平均直径(−0.058)>根体积(0.030)。对氮肥偏生产率的直接贡献程度表现为:根系活力(0.476)>根表面积(0.475)>根系投影面积(−0.260)>根系平均直径(−0.244)>根体积(0.085)>根干质量(0.068)>根长(0.052)。综上可知,马铃薯根系主要通过影响根系活力和根表面积促进马铃薯氮肥利用效率的提升。



注:NP、SP、RW、RL、RS、RP、RV、RD、RA、Y、AEN 和 PEPN 分别表示单株结薯数、单薯质量、根干质量、根长、根表面积、根系投影面积、根体积、根系平均直径、根系活力、产量、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力。实线代表直接通径,虚线代表间接通径。粗体数字为相关系数,不加粗数值为通径系数。**:$P<0.01$;*:$P<0.05$。下同。

Note: NP, SP, RM, RL, RS, RP, RV, RD, RA, Y, AEN, and PEPN represents the number of potatoes per plant, single potato mass, root dry mass, root length, root surface area, root projection area, root volume, root average diameter, root activity, yield, nitrogen fertilizer agronomic efficiency, and partial productivity of nitrogen fertilizer, respectively. The solid lines represent direct pathways and the dashed lines represent indirect pathways. Values in bold are the correlation coefficient and fine values are the path coefficient. **: $P<0.01$; *: $P<0.05$. The same below.

图 7 根系形态和根系活力与产量的通径分析

Fig.7 Path analysis of root morphological structure and root activity and yield

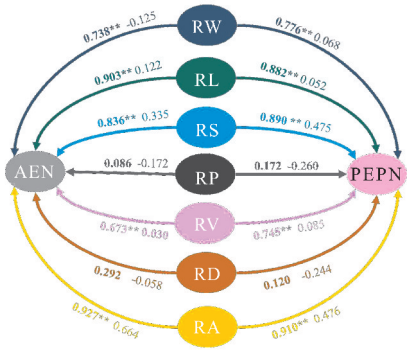


图 8 根系形态和根系活力与氮肥利用效率的通径分析

Fig.8 Path analysis of root morphological structure and root activity and nitrogen use efficiency

3 讨 论

3.1 马铃薯根系形态和根系活力对氮密互作的响应

根系是马铃薯重要的吸收和代谢器官,其生长状况直接影响马铃薯地上部的生长发育及马铃薯产量的形成。根系活力反映根系新陈代谢活动强弱,是衡量根系生长发育、养分吸收及其对环境胁迫响应能力的重要指标,培育发达、健壮的根系是提高作物增产潜力的重要措施[17]。

Li 等[18]研究发现,在干旱条件下,高氮抑制根系的分化,使根系生物量降低。本研究表明,在块茎膨大期与淀粉积累期,施氮 300 kg·hm^{-2}处理马铃薯根干质量显著低于施氮 200 kg·hm^{-2}处理。狄彩霞等[14]研究表明,施氮有利于马铃薯根系生长,但施氮量超过一定限度则对马铃薯根系生长产生

抑制作用。本研究也发现,随着施氮量的增加,在块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期,马铃薯单株和群体的根长、根表面积、根系投影面积、根体积和根系平均直径均表现为 N2>N3>N0;在块茎膨大期~淀粉积累期,N2 施氮量下根系活力均保持最高水平,说明在适宜施氮量下,根系具有较强的吸收养分的能力。

密度对作物根系结构和生长发育具有重要影响。黄海等[19]研究表明,玉米根系干质量、根系活力随栽培密度的增加呈先增大后降低趋势。本研究发现,在块茎膨大期与淀粉积累期,马铃薯单株根干质量、根长、根表面积、根系投影面积、根体积和根系活力均随栽培密度的增加表现为先升高后降低趋势;在块茎形成期,马铃薯根干质量、根系形态和根系活力则随着密度的增加而逐渐增加,可能是因为在生育期前期马铃薯植株矮小,个体之间竞争较小,6.75 万株 · hm^{-2}栽培密度下根系竞争使根系生长迅速,个体与群体间矛盾加剧,导致根系生长减弱[20]。当栽培密度为 5.25 万株 · hm^{-2}时,马铃薯单株根系能够获得较适宜的生长环境,有利于形成良好的根系形态并维持较高的根系活力。随着栽培密度提高,单株根系可获取的土壤养分相对减少[21],导致根系生长迟缓,难以壮大;而在三个关键生育时期,马铃薯的群体根系形态(根长、根表面积、根系投影面积和根体积)整体表现为 D3>D2>D1,表明高栽培密度虽会抑制单株根系发育,但由于单位面积群体株数增加,根系形态指标仍随种植密度的增加而增大。

3.2　氮密互作对马铃薯产量及氮素利用的影响

氮素是作物生长发育所需的关键营养元素,栽培密度是影响作物产量的重要栽培措施,二者对作物产量形成均具有显著影响。何万春等[22]研究发现,随着施氮量的增加,旱地马铃薯块茎产量呈先增加后减小趋势。本研究也表明,同一栽培密度下,在 200 kg · hm^{-2}的施氮量下马铃薯产量最高,当施氮量为 300 kg · hm^{-2}时,产量则开始下降。魏峭嵘等[23]研究发现,在东北湿润季风气候条件下,合理施氮有利于提高马铃薯单株结薯数,过量施氮会降低单薯质量。本研究发现,产量构成要素中单株结薯数对马铃薯产量的影响最大,单株结薯数随施氮量的增加呈先增加后降低趋势;而单薯质量随施氮量增加而增大,与前人研究结果不同可能是因为栽培密度和气候条件等方面差异,本研究施肥量未达到单薯质量的阈值。本研究发现,相同施氮量下,马铃薯产量随栽培密度的增加呈先增加后下降趋势,这与薛占奎等[24]的研究结果一致。前人研究表明,在半干旱区随着栽培密度的增大,马铃薯单株结薯数逐渐减小[25],与本研究结果一致。

氮肥是影响干旱半干旱地区作物生产力持续提高的主要因素,提高其利用效率对旱地马铃薯高产优质高效生产十分重要。前人研究表明,马铃薯氮肥利用效率随施氮量的增加呈先增加后减少趋势[26]。本研究发现,同一栽培密度下,200 kg · hm^{-2}施氮量下马铃薯氮肥农学利用率和氮肥偏生产力均显著大于 300 kg · hm^{-2}施氮量处理,说明氮肥用量过高时,氮素会因作物吸收不及时而流失,造成氮肥利用效率下降[27]。有研究表明,适宜的栽培密度可以增加根系对土壤中营养元素的吸收、转移与利用,进而提高马铃薯产量和氮肥利用效率[28]。本研究发现,同一施氮量下,马铃薯氮肥农学利用率和氮肥偏生产力均随着栽培密度的增加先增大后减小,在栽培密度为 5.25 万株 · hm^{-2}时最大。在埃塞俄比亚东部哈拉玛亚地区的研究发现,施氮 110 kg · hm^{-2}配合栽培密度 6.67 万株 · hm^{-2}条件下块茎产量最高[29];也有研究表明,施氮 80 kg · hm^{-2}配合栽培密度 11 万株 · hm^{-2}条件下,马铃薯氮肥利用效率与产量均最大[30];而本研究以施氮 200 kg · hm^{-2}、栽培密度 5.25 万株 · hm^{-2}处理马铃薯产量与氮肥利用效率最高,可能是不同试验气候条件、土壤基础肥力与栽培品种不同而造成的。

3.3　马铃薯根系形态和根系活力对产量与氮肥利用效率的调控

马铃薯为块茎类作物,其块茎与根系生长环境一致。前人研究发现,施氮量对植株体内生理代谢和根系生长发育有显著影响,能够调控和局部刺激根系的生长和对养分的吸收,从而增加结薯数和大中薯比率,最终达到增加马铃薯产量的目的[4]。作物根系生长具有可塑性,适宜的栽培密度可以促进根系生长,有利于提高产量[21]。本研究表明,在该栽培条件下,块茎膨大期和淀粉积累期均以施氮 200 kg · hm^{-2}、栽培密度 5.25 万株 · hm^{-2}处理根系形态和根系活力表现最好,且两年产量最高,这说明马铃薯生长前期有效根形成,根系粗壮且深扎有利于匍匐茎分化为块茎,促进结薯数的增加,从而提高产量[9]。本研究条件下,马铃薯根系主要通过影响根干质量、根表面积和根体积的增大,使马铃薯根系分化能力增强,促进马铃薯单株结薯数增加,从而使马铃薯产量增加。

根系是吸收土壤养分的主要器官,根系形态对养分吸收有显著影响,根系活力也是衡量作物根系

对养分吸收能力的重要指标[31-32]。有研究表明,养分供应通过改变根系性状影响产量与氮肥利用效率[33]。在6.25万株·hm^{-2}种植密度下,马铃薯在块茎膨大期和淀粉积累期根系大量拥挤在土壤中,根系对环境资源竞争加剧,导致植物生长状况下降,使根系提前衰老,根系功能降低,导致吸收氮素等营养物质能力减弱[8]。本研究发现,马铃薯主要通过根系活力和根表面积影响氮肥利用效率,且施氮200 kg·hm^{-2}、栽培密度5.25万株·hm^{-2}处理马铃薯在块茎膨大期和淀粉积累期的根长、根表面积、根系投影面积、根体积和根系活力最大,氮肥偏生产力和氮肥农学利用率最高,这与前人研究结果相似[34],这表明发达的根系可增加自身对土壤养分的吸收面积和吸收能力,从而提高氮肥利用效率[35]。

4 结 论

通径分析表明,马铃薯产量主要受根干质量、根表面积和根体积直接影响,氮肥利用效率则主要由根系活力和根表面积调控。与其他处理相比,施氮200 kg·hm^{-2}配合栽培密度5.25万株·hm^{-2}处理马铃薯在块茎膨大期根系活力显著提高9.54%~151.15%,根体积显著增加13.89%~63.05%;在块茎膨大期和淀粉积累期,根干质量分别显著增加9.54%~151.15%和3.89%~134.41%,根表面积分别显著增加12.73%~65.08%和7.37%~91.03%,有利于单株结薯数的形成,从而使马铃薯产量提高3.94%~169.25%,氮肥农学利用率增加2.74%~108.56%,氮肥偏生产力提高3.95%~121.55%,可作为陇中旱农区马铃薯适宜的氮密互作栽培模式。

参 考 文 献:

[1] 韦孟, 许慧珍, 张宁, 等. 中国马铃薯加工业现状调查分析及发展对策[J]. 中国马铃薯, 2024, 38(2): 176-185.
WEI M, XU H Z, ZHANG N, et al. Investigation on current situation of potato processing industry and relevant countermeasure in China[J]. Chinese Potato Journal, 2024, 38(2): 176-185.

[2] 张绪成, 王红丽, 于显枫,等. 半干旱区全膜覆盖垄沟间作种植马铃薯和豆科作物的水热及产量效应[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 468-481.
ZHANG X C, WANG H L, YU X F, et al. The study on the effect of potato and beans intercropping with whole field plastics mulching andridge-furrow planting on soil thermal-moisture status and crop yield on semi-arid area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(3): 468-481.

[3] 张明. 定西市马铃薯高产高效栽培技术[J]. 中国农业信息, 2016, (6): 83-84.
ZHANG M. High-yield and high-efficiency potato cultivation technology in Dingxi city[J]. China Agricultural Information, 2016, (6): 83-84.

[4] 吴巍, 赵军. 植物对氮素吸收利用的研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(13): 75-78.
WU W, ZHAO J. Advances on plants' nitrogen assimilation and utilization[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(13): 75-78.

[5] 陈亚兰, 张健, 韩徽仁, 等. 陇中干旱半干旱地区马铃薯养分资源投入的调查与分析[J]. 中国马铃薯, 2013, 27(4): 208-211.
CHEN Y L, ZHANG J, HAN J R, et al. Investigation and analysis of potato nutrient resource inputting in Longzhong arid and semiarid area[J]. Chinese Potato Journal, 2013, 27(4): 208-211.

[6] GOFFART J P, OLIVIER M, FRANKINET M. Potato crop nitrogen status assessment to improve N fertilization management and efficiency: past-present-future[J]. Potato Research, 2008, 51(3): 355-383.

[7] 孙美迪, 段文学, 张海燕, 等. 施氮对不同耐氮性甘薯品种干物质积累与分配及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2017, 49(3): 78-82, 88.
SUN M D, DUAN W X, ZHANG H Y, et al. Effects of nitrogen fertilizer on dry matter accumulation, distribution and root yield of sweet potato cultivars with different nitrogen tolerance[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2017, 49(3): 78-82, 88.

[8] 李建强, 王强, 马军伟, 等. 氮肥减施时期对水稻产量、氮肥利用率及氮肥去向的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024, (8): 147-153.
LI J Q, WANG Q, MA J W, et al. Effects of nitrogen reduction time on rice yield,nitrogen use efficiency and fate of fertilizer nitrogen[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024, (8): 147-153.

[9] 韩悌倩, 刘震, 刘玉汇,等. 减氮及有机替代对马铃薯根系形态和产量的影响[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(12): 2111-2118.
HAN T Q, LIU Z, LIU Y H, et al. Effects of reduced chemical nitrogen and organic manure substitution on potato root mor-phology and yield[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2020,32(12): 2111-2118.

[10] 王春艳, 孟浩峰, 李玲玲, 等. 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[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(5): 118-127, 138.
WANG C Y, MENG H F, LI L L, et al. Effects of nitrogen-dense interaction on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and yield of dryland potatoes[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(5): 118-127, 138.

[11] 齐爽, 廉华, 马光恕, 等. 不同栽培密度对马铃薯生长特性的影响[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(24): 71-73.
QI S, LIAN H, MA G S, et al. Effects of different planting densities on growth characteristics of potato[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2009, 15(24): 71-73.

[12] 刘思家, 王小林, 李博洋, 等. 种植密度对绿豆根系形态、光合特性及产量的影响[J]. 山西农业科学, 2024, 52(5): 24-32.
LIU S J, WANG X L, LI B Y, et al. Effects of planting density on root morphology,photosynthetic characteristics and yield of mung bean[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024, 52(5): 24-32.

[13] 金光辉, 高幼华, 刘喜才, 等. 种植密度对马铃薯农艺性状及产量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2015, (7): 16-21.
JIN G H, GAO Y H, LIU X C, et al. Effect of planting density on the agronomic traits and yield of potato[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015, (7): 16-21.

[14] 狄彩霞, 李秀萍, 栗艳芳, 等. 不同氮钾配比对马铃薯根系生长

及产量的影响[J]. 北方农业学报, 2021, 49(1): 53-59.
DI C X, LI X P, LI Y F, et al. Effects of different ratios of nitrogen and potassium on root growth and yield in potato[J]. Journal of Northern Agriculture, 2021, 49(1): 53-59.

[15] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002: 115-124.
CHEN J X, WANG X F. Plant physiology experiment guidance[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002: 115-124.

[16] 於凝, 王林林, 李玲玲, 等. 水肥一体化减氮对陇中地区马铃薯产量和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(4): 70-78.
YU N, WANG L L, LI L L, et al. Effects of integrated water and fertilizer nitrogen reduction on potato yield and water use efficiency in Longzhong region of Gansu province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(4): 70-78.

[17] LIAO M T, FILLERY I R P, PALTA J A. Early vigorous growth is a major factor influencing nitrogen uptake in wheat[J]. Functional Plant Biology, 2004, 31(2): 121-129.

[18] LI S C, CHEN H Y, JIANG S C, et al. Selenium and nitrogen fertilizer management improves potato root function, photosynthesis, yield and selenium enrichment[J]. Sustainability, 2023, 15(7): 6060.

[19] 黄海, 常莹, 刘雪梅, 等. 玉米根系相关特征对群体密度的响应[J]. 华南农业大学学报, 2014, 35(5): 36-41.
HUANG H, CHANG Y, LIU X M, et al. The response of maize root characteristics on population density[J]. Journal of South China Agricultural University, 2014, 35(5): 36-41.

[20] 王凯, 贾永红, 罗四维, 等. 播种方式和种植密度对冬小麦根系生长和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(2): 225-232.
WANG K, JIA Y H, LUO S W, et al. Effect of sowing pattern and planting density on root growth and yield of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(2): 225-232.

[21] 王丹, 张永清, 张萌, 等. 根土空间与种植密度互作对藜麦根系分布及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(21): 79-86.
WANG D, ZHANG Y Q, ZHANG M, et al. Effects of root-soil space and planting density interactions on quinoa root distribution and yield[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(21): 79-86.

[22] 何万春, 何昌福, 邱慧珍, 等. 不同氮水平对旱地覆膜马铃薯干物质积累与分配的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 175-182.
HE W C, HE C F, QIU H Z, et al. Effects of nitrogen rates on dry matter accumulation and distribution of potato plants under film mulching in dry land[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(4): 175-182.

[23] 魏峭嵘, 曹敏建, 石瑛, 等. 氮素水平对马铃薯全生育期光合特性及产量的影响[J]. 基因组学与应用生物学, 2017, 36(1): 324-330.
WEI Q R, CAO M J, SHI Y, et al. Effects of nitrogen application rate on photosynthetic characteristics and yield of potato in the whole growth period[J]. Genomics and Applied Biology, 2017, 36(1): 324-330.

[24] 薛占奎, 胡谷琅, 徐晶晶, 等. 种植密度及肥料运筹对马铃薯产量及经济性状的影响[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(6): 953-955.
XUE Z K, HU G L, XU J J, et al. Effects of planting density and fertilizer management on potato yield and economic traits[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2017, 58(6): 953-955.

[25] 马金虎, 马步朝, 陈世敏, 等. 半干旱区秋覆膜马铃薯种植密度对产量的影响[J]. 宁夏农林科技, 2011, 52(2): 15-15, 94.
MA J H, MA B Z, CHEN S M, et al. Effect of potato planting density on yield in autumn in semi-arid region[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2011, 52(2): 15-15, 94.

[26] 岳超, 肖石江, 王怀义, 等. 氮肥用量对不同冬马铃薯品种产量及氮肥利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (2): 119-125, 132.
YUE C, XIAO S J, WANG H Y, et al. Effect of nitrogen fertilizer rate on yield and nitrogen use efficiency of different winter potato varieties[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2019, (2): 119-125, 132.

[27] 黄继川, 彭智平, 于俊红, 等. 不同氮肥用量对冬种马铃薯产量、品质和氮肥利用率的影响[J]. 热带作物学报, 2014, 35(2): 266-270.
HUANG J C, PENG Z P, YU J H, et al. Effects of nitrogen application rate on yield, quality and nitrogen efficiency of winter potato[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2014, 35(2): 266-270.

[28] 范香全, 张胜, 蒙美莲, 等. 施氮量及密度对膜下滴灌马铃薯氮素吸收与利用的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(14): 4272-4274, 4421.
FAN X Q, ZHANG S, MENG M L, et al. Effects of N application and planting density on N uptake and use of mulched drip irrigation potato[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(14): 4272-4274, 4421.

[29] GETIE A T, DECHASSA N, TANA T. Response of potato (*Solanum tuberosum* L.) yield and yield components to nitrogen fertilizer and planting density at haramaya, eastern ethiopia[J]. Journal of Plant Sciences, 2015, 3(6): 320-328.

[30] SHAHZAD J S, ROGHAYYEH Z M, ASGAR Y. Response of agronomical, physiological, apparent recovery nitrogen use efficiency and yield of potato tuber (*Solanum tuberosum* L.), to nitrogen and plant density[J]. American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 2010, 9(1): 16-21.

[31] GUO H, TIAN Z W, SUN S Z, et al. Preanthesis root growth and nitrogen uptake improved wheat grain yield and nitrogen use efficiency[J]. Agronomy Journal, 2019, 111(6): 3048-3056.

[32] LYNCH J P. Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems[J]. Annals of Botany, 2013, 112(2): 347-357.

[33] DU M, ZHANG W Z, GAO J P, et al. Improvement of root characteristics due to nitrogen, phosphorus, and potassium interactions increases rice (*Oryza sativa* L.) yield and nitrogen use efficiency[J]. Agronomy, 2021, 12(1): 23.

[34] MCMURTRIE R E, IVERSEN C M, DEWAR R C, et al. Plant root distributions and nitrogen uptake predicted by a hypothesis of optimal root foraging[J]. Ecology and Evolution, 2012, 2(6): 1235-1250.

[35] PALTA J A, FILLERY I R P, REBETZKE G J. Restricted-tillering wheat does not lead to greater investment in roots and early nitrogen uptake[J]. Field Crops Research, 2007, 104(1/3): 52-59.