doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.068

深松施氮对旱作马铃薯根系生长与氮素利用特征的影响

李　荣[1]　刘婷婷[1]　马晓明[2]　张悦薇[1]　张　旭[1]　侯贤清[1]
(1.宁夏大学农学院,银川 750021;2.青铜峡市农业技术和农机化推广服务中心,青铜峡 751600)

摘要:于 2021—2022 年连续两年通过设置翻耕 20 cm(F20)、深松 30 cm(S30)、深松 40 cm(S40)、深松 50 cm(S50)4 种耕作深度和 0 kg/hm²(N0)、90 kg/hm²(N90)、180 kg/hm²(N180)、270 kg/hm²(N270)4 种施氮量进行了大田试验,研究深松施氮对土壤水分、氮素含量、马铃薯根长、根系活力、各器官氮素累积量、氮素利用效率及产量的影响。结果表明,与翻耕 20 cm 处理相比,增加深松深度可提高马铃薯播后 60~120 d 土壤蓄水量和含水率,以 S50 处理效果最佳,而施氮量增加则降低土壤蓄水量和含水率。深松施氮显著提高土壤全氮和碱解氮含量,以 S30×N270(2021 年)和 S40×N270、S50×N270(2022 年)处理增幅最高。马铃薯根长和根系活力在 2021 年以 S30×N180 处理最高,2022 年以 S40×N180 处理最高。深松施氮显著影响氮素累积量,同一耕作深度下,N180 处理最高,同一施氮量下,深松 30~40 cm 最高。马铃薯产量在 2021 年以 S30×N180 处理最高,2022 年以 S40×N180 处理最高。通过对耕作深度和施氮量与马铃薯产量关系的拟合发现,当耕作深度为 35.1~37.2 cm 结合施氮量 151.5~160.7 kg/hm²时,可协同实现马铃薯高产和氮肥高效利用。深松施氮能够显著改善氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥利用率,以深松深度 30~40 cm 结合施氮量 90~180 kg/hm²效果最佳。综上,深松施氮可显著改善宁南旱地土壤水氮环境,促进根系生长,提高氮素利用效率和马铃薯产量,建议深松深度 35~40 cm 结合施氮量 151~180 kg/hm²作为宁南旱作马铃薯增产和氮高效利用的深松施氮措施。

关键词:马铃薯;根系活力;氮素利用;深松施氮;土壤水氮
中图分类号:S532;S341.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)11-0696-12　　**OSID**:

Effects of Subsoiling Combined with Nitrogen Application on Root Growth and Nitrogen Utilization Characteristics of Rainfed Potato

LI Rong[1]　LIU Tingting[1]　MA Xiaoming[2]　ZHANG Yuewei[1]　ZHANG Xu[1]　HOU Xianqing[1]
(1. *School of Agriculture*, *Ningxia University*, *Yinchuan* 750021, *China*
2. *Agricultural Technology and Agricultural Mechanization Promotion Service Center of Qingtongxia*, *Qingtongxia* 751600, *China*)

Abstract: A field experiment was conducted over two consecutive years (2021—2022) to investigate the effects of subsoiling combined with nitrogen application on soil moisture, nitrogen content, potato root length, root activity, nitrogen accumulation in various organs, nitrogen use efficiency, and yield. The experimental design comprised four tillage treatments: conventional tillage at 20 cm depth (F20), and subsoiling at 30 cm (S30), 40 cm (S40), and 50 cm (S50) depths, combined with four nitrogen application rates: 0 kg/hm²(N0), 90 kg/hm²(N90), 180 kg/hm²(N180), and 270 kg/hm²(N270). The results showed that increasing subsoiling depth compared with conventional tillage at 20 cm significantly enhanced soil water storage and moisture content during the period of 60~120 days after potato sowing, with the best effect observed under the S50 treatment. Conversely, an increase in nitrogen application rate reduced soil water storage and moisture content. The combination of subsoiling with nitrogen application significantly increased soil total nitrogen and alkali-hydrolyzable nitrogen content, and the S30×N270 treatment in 2021 and the S40×N270 and S50×N270 treatments in 2022 showed the highest increases. Potato root length and root vigor were significantly influenced by the interaction of tillage depth and nitrogen application. In 2021, the S30×N180 treatment exhibited the best

收稿日期:2025-03-26　修回日期:2025-06-10
基金项目:国家自然科学基金项目(32160515)和宁夏大学研究生创新项目(CXXM202429)
作者简介:李荣(1984—),女,副教授,主要从事土壤培肥研究,E-mail:lironge_mail@126.com
通信作者:侯贤清(1981—),男,教授,主要从事农田水肥高效利用研究,E-mail:houxianqing1981@126.com

performance, while in 2022, the S40 × N180 treatment was the highest. The combination of subsoiling and nitrogen application significantly affected nitrogen accumulation. Under the same tillage depth, the N180 treatment showed the highest effect, while under the same nitrogen application rate, subsoiling at 30 ~ 40 cm depth achieved the highest performance. Potato yield was significantly influenced by the interaction of tillage depth and nitrogen application. In 2021, the S30 × N180 treatment resulted in the highest yield, while in 2022, the S40 × N180 treatment was optimal. Through fitting the relationship between tillage depth and nitrogen application rate with potato yield, it was found that a tillage depth of 35.1 ~ 37.2 cm combined with a nitrogen application rate of 151.5 ~ 160.7 kg/hm^2 could achieve synergistic improvement in both high yield of potato and nitrogen use efficiency. The combination of subsoiling and nitrogen application effectively improved agronomic nitrogen use efficiency, nitrogen partial productivity, and nitrogen use efficiency. The optimal effect was observed with subsoiling at a depth of 30 ~ 40 cm combined with a nitrogen application rate of 90 ~ 180 kg/hm^2. In conclusion, the combination of subsoiling and nitrogen application significantly improved the soil water and nitrogen environment in dryland areas of southern Ningxia, promoted potato root growth, enhanced nitrogen use efficiency, and increased potato yield. It was recommended that subsoiling depth at 35 ~ 40 cm combined with the nitrogen application rate of 151 ~ 180 kg/hm^2 can be adopted as an integrated tillage with nitrogen management strategy for potato production and efficient nitrogen utilization in the dryland areas of southern Ningxia.

Key words: potato; root activity; nitrogen utilization; subsoiling combined with nitrogen application; soil water and nitrogen

0　引言

宁南旱作区位于黄土高原半干旱区,该地区常年延用传统耕作方式,导致耕层以下通透性差,作物根系下扎受阻,影响水肥吸收利用。同时,农户为提高作物产量大量施用氮肥,加重氮肥淋溶,盈余的氮素以各种形式进入大气、水体和土壤,造成温室效应、土壤酸化、地下水的硝酸盐污染等环境问题[1]。传统耕作方式和不合理的施氮量严重制约了宁南旱作区马铃薯产量,并增加了农业面源污染风险。因此,通过研究合理耕作措施结合适宜施氮量下马铃薯根系生长及氮素利用特征,对促进宁南旱作区马铃薯产业绿色发展和降低土壤环境污染风险具有重要战略意义。

深松作为一种保护性耕作措施,可打破犁底层,疏松土壤,促进根系下扎,有利于根系对水肥的吸收,提高水肥利用率。与传统耕作方式相比,当深松深度为 30 cm 时,可创造更多根系与氮素等养分接触面积,提高根系对氮素的吸收效率[2]。然而连年深松 10 a 以上会使土壤蓄水能力下降,不利于作物根系发育[3]。适当施氮可提高根系活力和氮素利用率[4],而施氮量过高或过低会促进根系横向和纵向伸长,降低水肥利用效率[5]。可见,单一耕作方式或不合理施氮对土壤环境和作物生长均存在优缺点。有研究发现,深松深度 30 ~ 40 cm 结合施氮量 150 kg/hm^{2}可提高水分和氮素吸收,促进根系生长,进一步提高旱地作物对土壤氮和肥料氮的吸收能力,促进营养和生殖生长,进而提高作物产量[6]。

尽管关于深松和施氮对马铃薯生长调控的单一因素研究已较为充分,但针对不同深松深度与施氮量协同作用对马铃薯根系发育及氮素利用效率的调控机制研究仍显不足。尤其是在深松-施氮互作对根系形态、氮素吸收利用的关键影响因子及其内在关联机制方面尚缺乏系统性研究。基于此,本研究通过建立耕作深度与施氮量的双因素交互处理,旨在阐明深松-施氮协同调控下马铃薯根系形态动态响应特征,解析马铃薯产量、氮素利用率与土壤水氮、根系特性间的量化关系,揭示影响马铃薯产量和氮素利用的关键主导因子及互作效应,为宁南旱区筛选最优深松-施氮组合模式提供理论支撑,同时为实现区域马铃薯高产和氮肥高效利用提供实践指导。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于 2021—2022 年在宁夏回族自治区海原县树台乡大坝台村马铃薯种植基地(36°06′N, 105°31′E)进行。该区位于宁夏南部干旱区,海拔 2 166 m,年降水量 270 ~ 400 mm,无霜期 140 ~ 150 d,年平均气温 6.8℃。试验地 2021、2022 年总降水量分别为 317.7、305.7 mm,根据国内降水年型标准评判[7],可知 2021 年和 2022 年均为枯水年。试验前耕层(0 ~ 60 cm)土壤干容重为 1.34 g/cm^3、总孔隙度为 49.4%、田间持水率为 39.7%、凋萎系数为 7.8%,土壤有机质、全氮含量分别为 12.6、0.29 g/kg,土壤速效氮、磷、钾含量分别为 19.2、

11.1、166.4 mg/kg。

1.2 试验设计

在 2020 年 10 月和 2021 年 10 月秋作收获后连续两年布设大田试验。采用双因素裂区设计,主因素为 4 种耕作深度:翻耕 20 cm(F20)、深松 30 cm(S30)、深松 40 cm(S40)和深松 50 cm(S50);副因素设 4 种纯氮施用量:0 kg/hm^2(N0)、90 kg/hm^2(N90)、180 kg/hm^2(N180)和 270 kg/hm^2(N270),以翻耕 20 cm 不施氮为对照,共 16 个处理,3 次重复,小区面积 8 m×4 m=32 m^2,每个小区两边各设置 1 m 保护行。

供试品种为‘青薯 9 号’,种植密度为 6×10^{4}株/hm^2,宽窄行种植,宽行距 60 cm,窄行距 40 cm,株距 30 cm,垄宽 60 cm,沟宽 40 cm,垄高 10 cm。秋收后分别采用专用铧犁拖拉机和可调整深度的维宏 1S-230 型深耕机进行翻耕(耕作深度 20 cm,耕后耙耱各 1 次)和深松处理(耕作深度 30、40、50 cm),然后冬春休闲,次年 5 月初穴播马铃薯。试验处理前一直采用传统翻耕(耕作深度 20 cm),结合秋耕进行秋施肥,秋耕前施基肥过磷酸钙(P_2O_5含量大于等于 16%)90 kg/hm^2、硫酸钾(K_2O含量大于等于 50%)90 kg/hm^2,氮肥按试验设计量的 70%作为基肥结合耕作分别施入各处理小区,30%在马铃薯现蕾期追肥。试验期间无灌水,人工除草。马铃薯分别于 2021 年 5 月 2 日和 2022 年 4 月 22 日播种,于 2021 年 10 月 15 日和 2022 年 10 月 20 日收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水率

在马铃薯播后 60、90、120 d,利用土钻取土干燥法测定 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 层土壤含水率,并计算 0~100 cm 层土壤蓄水量。

1.3.2 土壤全氮、碱解氮含量

在马铃薯播后 150 d,垄侧用土钻按 5 点采样法分别采集 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 层混合土样,装入自封袋中带回实验室风干、磨细,过 0.25 mm 和 1 mm 筛用于测定土壤全氮、碱解氮含量。土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定,土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定。

1.3.3 根长和根系活力

根据 3D monolith 根系空间取样方法,在马铃薯播后 60、90、120 d,各处理随机选取长势均匀并且位置连续的 3 株马铃薯挖取根系,以茎为中心,挖半径为 10 cm、高为 40 cm 近似圆柱体,挖出土壤和所有根系,从中挑出所有根系并用清水洗去黏连在根上的黏土,带回实验室测定指标。根长用 Win Rhizo 根系图像分析软件扫描测定,根系活力采用 TTC 法测定。

1.3.4 植株全氮含量

在马铃薯播后 150 d(收获期)收集有代表性的 3 株植株,分别将马铃薯根、茎、叶和块茎单独存放,于 105℃下杀青 1 h,75℃干燥至恒定质量,将干燥的不同器官植株样品粉碎后过 0.25 mm 筛,用凯氏定氮法测定全氮含量。

1.3.5 马铃薯产量

收获期测定各处理马铃薯产量,将各处理小区全部植株进行收获,扣除收获薯块总质量的 1.5%作为杂质和含土量,根据小区实测产量折算公顷产量。

1.4 数据分析与绘图

利用 Excel 2016 整理数据。采用 SPSS 27.0 软件进行双因素裂区方差分析,通过 Duncan 法进行多重比较分析($\alpha=0.05$)。Origin 2023 软件作图。

2 结果与分析

2.1 深松施氮对土壤水氮特征的影响

2.1.1 土壤含水率

由图 1(图中误差棒表示 $\alpha=0.05$ 水平上的差异性)可知,深松施氮各处理下,同一土层土壤含水率随着生育期(60~120 d)推进呈逐渐增加趋势,在 120 d 达到最大值。同一播后时间,随着土层深度的增加,土壤含水率呈先增加后降低趋势,在 40 cm 处达到最大值。深松 50 cm 结合不施氮处理可显著提高马铃薯 0~60 cm 土层土壤含水率。

马铃薯播后 60 d,各处理下,40 cm 土层相较于 20 cm 土层、60 cm 土层,2021 年含水率分别显著提高 8.0%、4.7%,2022 年分别显著提高 6.1%、9.6%,同一耕作深度下,两年均以 N0 处理土壤含水率最高;同一施氮量下,两年均以 S50 处理含水率最高,相较于 F20 处理分别显著提高 35.6%和 22.5%;二者交互,两年均以 S50×N0 处理含水率最高。马铃薯播后 90 d,各处理下,40 cm 土层相较于 20 cm 土层、60 cm 土层,2021 年含水率分别显著提高 5.3%、7.5%,2022 年分别显著提高 7.2%、5.4%,同一耕作深度下,两年均以 N0 处理含水率最高;同一施氮量下,两年均以 S50 处理含水率最高,分别相较于 F20 处理显著提高 30.4%和 25.9%;二者交互,两年均以 S50×N0 处理含水率最高。马铃薯播后 120 d,各处理下,40 cm 土层相较于 20 cm 土层、60 cm 土层,2021 年分别显著提高 6.4%、5.8%,2022 年分别显著提高 3.6%、5.9%,

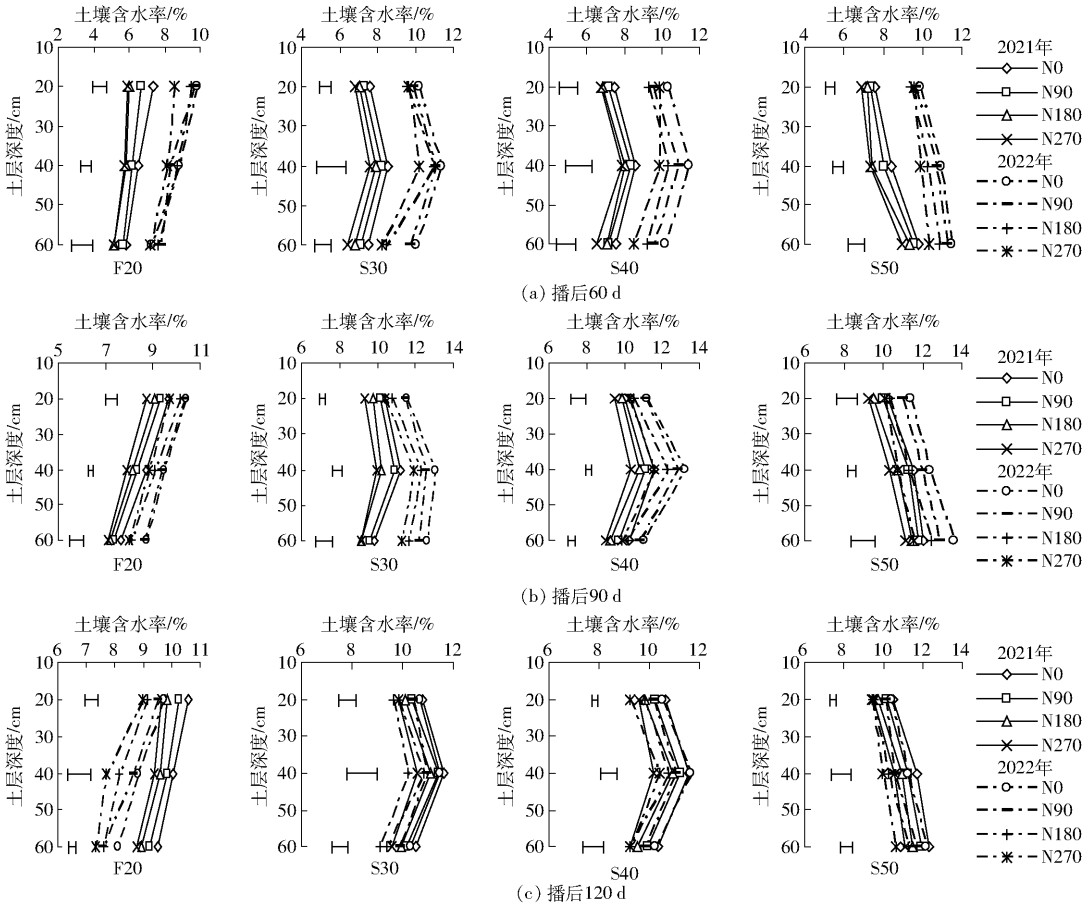


图 1　深松施氮处理 0 ~ 60 cm 层土壤含水率变化曲线

Fig. 1　Soil water content in 0 ~ 60 cm layer under subsoiling combined with nitrogen application

同一耕作深度下,两年均以 N0 处理含水率最高;同一施氮量下,两年均以 S50 处理含水率最高,分别相较于 F20 处理显著提高 13.6% 和 25.4%;二者交互,两年均以 S50 × N0 处理最高。

2.1.2　土壤蓄水量

由图 2(图中不同小写字母表示同一耕作深度下各施氮处理间差异显著;T 表示耕作深度,N 表示施氮量,T × N 表示耕作施氮交互作用; ** 表示在 $\alpha = 0.01$ 水平上显著。下同)可知,试验期间,随着生育期推进,0 ~ 100 cm 土层土壤蓄水量呈增加趋势。耕作深度和施氮量对马铃薯播后 60、90、120 d 土壤蓄水量均有极显著影响,二者交互效应不显著。深松 50 cm 结合不施氮处理可显著提高马铃薯关键生育期 0 ~ 100 cm 层土壤蓄水量。

马铃薯播后 60 d,同一耕作深度下,N180、N270 处理土壤蓄水量较 N0 处理,2021 年分别显著降低 9.6%、13.8%,2022 年分别显著降低 6.0%、8.4%;同一施氮量下,2021 年和 2022 年均以 S50 处理土壤蓄水量最高,分别较 F20 处理显著提高 23.9% 和 10.5%;二者交互,2021 年和 2022 年均以 S50 × N0 处理最高。马铃薯播后 90 d,同一耕作深度下,N180、N270 处理土壤蓄水量较 N0 处理,2021 年分别显著降低 7.0%、5.7%,2022 年分别显著降低 6.5%、5.7%;同一施氮量下,2021 年以 S50 处理最高,2022 年以 S30 处理最高,分别较 F20 处理显著提高 16.7% 和 11.8%;二者交互,2021 年以 S50 × N0 处理最高,2022 年以 S30 × N0 处理最高。马铃

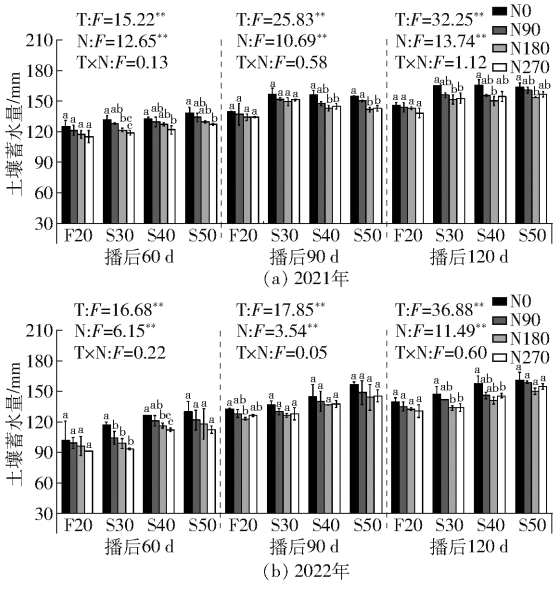


图 2　深松施氮处理 0 ~ 100 cm 层土壤蓄水量

Fig. 2　Soil water storage in 0 ~ 100 cm layer under subsoiling combined with nitrogen application

薯播后 120 d,同一耕作深度下,N90、N180 和 N270 处理土壤蓄水量较 N0 处理,2021 年分别显著降低 3.1%、8.0%和 6.6%,2022 年分别显著降低 3.8%、6.6%和 6.0%;同一施氮量下,2021 年和 2022 年均以 S50 处理最高,分别较 F20 处理显著提高 16.1%和 11.2%;二者交互,2021 年以 S50×N0 处理最高,2022 年以 S40×N0 处理最高。

2.1.3 土壤氮素含量

由图 3 可知,在马铃薯播后 150 d,随着耕层加深,0~60 cm 土层土壤全氮、碱解氮含量逐渐降低。深松 30~40 cm 结合施氮量 270 kg/hm^{2}可显著提高土壤全氮和碱解氮含量。

同一耕作深度下,不同土层(0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm)土壤全氮含量和碱解氮含量两年均以 N270 处理最高,与 N0 处理相比,2021 年全氮含量分别显著提高 57.1%、58.3%和 66.7%,碱解氮含量分别显著提高 112.4%、126.9%和 138.7%;2022 年全氮含量分别显著提高 34.6%、26.1%和 33.3%,碱解氮含量分别显著提高 169.3%、160.0%和 170.8%。同一施氮量下,2021 年不同土层(0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm)土壤全氮含量和碱解氮含量均以 S30 处理最高,与 F20 相比,全氮含量分别显著提高 28.1%、20.7%和 18.2%,碱解氮含量分别显著提高 23.1%、21.8%和 32.8%;2022 年 0~20 cm 和 20~40 cm 层土壤全氮含量以 S40 处理最高,40~60 cm 土层以 S30 处理最高,与 F20 相比,全氮含量分别显著提高 22.2%、16.7%和 15.0%,0~20 cm 土层土壤碱解氮含量以 S30 处理最高,20~40 cm 和 40~60 cm 土层以 S50 处理最高,与 F20 相比,碱解氮含量分别显著提高 17.3%、23.8%和 47.4%。二者交互,2021 年不同土层(0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm)土壤全氮与碱解氮含量均以 S30×N270 处理提升效果最佳,其中 0~20 cm,S30×N270 处理土壤全氮与碱解氮含量较 F20×N0 处理分别显著增加 96.2%和 172.6%;2022 年土壤全氮含量在 0~20 cm 以 S40×N270 处理最高,较 F20×N0 处理显著增加 62.5%,20~40 cm 和 40~60 cm 土层分别以 S40×N270、S30×N270 处理最高;土壤碱解氮含量在 0~20 cm 土层以 S30×N270 处理最高,较 F20×N0 处理显著增加 239.3%,在 20~40 cm 和 40~60 cm 土层以 S50×N270 处理最高。

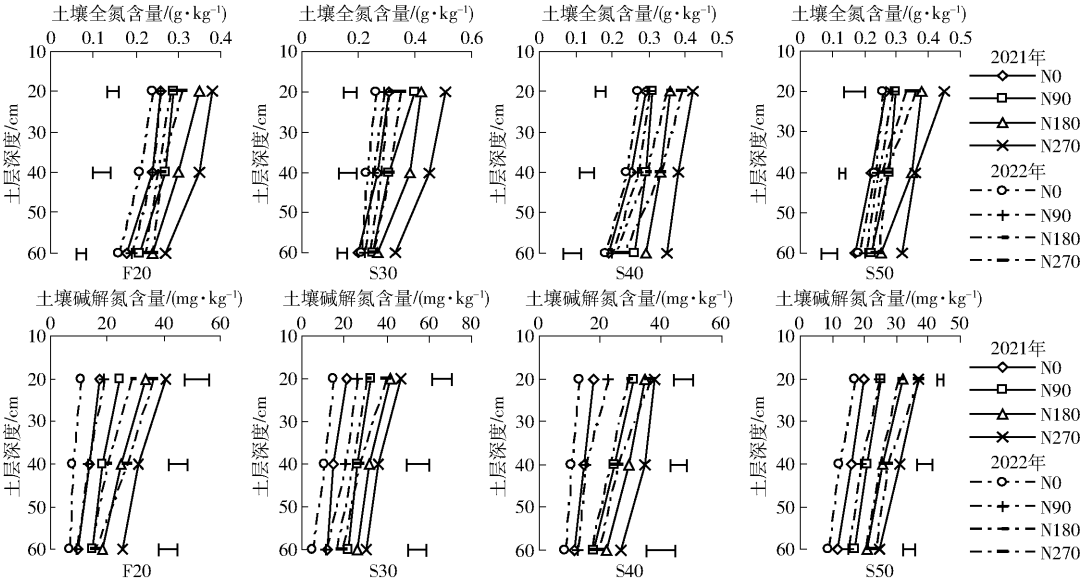


图 3 深松施氮处理 0~60 cm 层土壤氮素含量

Fig. 3 Nitrogen content in 0~60 cm soil layer under subsoiling combined nitrogen application

2.2 深松施氮对马铃薯根长和根系活力的影响

2.2.1 马铃薯根长

由图 4(图中*表示在 $\alpha=0.05$ 水平上显著)可知,随生育期推进,马铃薯根长逐渐增大,在播后 120 d 达到最大。耕作深度和施氮量对马铃薯播后 60~120 d 根长有极显著影响,二者交互对 2021 有显著影响,对 2022 年播后 60 d 有极显著影响,播后 90~120 d 无显著影响。深松施氮可显著提高马铃薯关键生育期根长,其中深松 30~40 cm 结合施氮量 180 kg/hm^{2}处理提升效果最佳。

马铃薯播后 60 d,同一耕作深度下 2021 年和 2022 年均以 N180 处理根长最高,与 N0 处理相比,分别显著提高 18.0%和 19.9%;同一施氮量下 2021 年以 S30 处理最高,2022 年以 S40 处理最高,与 F20 处理相比,分别显著提高 15.7%和 14.5%;二者交互,2021 年以 S30×N180 处理最高,2022 年以 S40×N180 处理最高,分别较 F20×N0 处理显著提高 27.4%和 39.2%。马铃薯播后 90 d,同一耕作深度

下两年均以 N180 处理根长最高，与 N0 处理相比，分别显著提高 21.6% 和 14.1%；同一施氮量下两年均以 S30 处理最高，与 F20 处理相比，分别显著提高 8.7% 和 14.1%；二者交互，两年均以 S30 × N180 处理最高，分别较 F20 × N0 处理显著提高 27.1% 和 17.0%。马铃薯播后 120 d，同一耕作深度下两年均以 N180 处理根长最高，与 N0 处理相比，分别显著提高 15.8% 和 20.4%；同一施氮量下两年均以 S30 处理最高，与 F20 处理相比，分别显著提高 23.1% 和 10.1%，二者交互，两年均以 S30 × N180 处理最高，较 F20 × N0 处理分别显著提高 31.5% 和 35.1%。

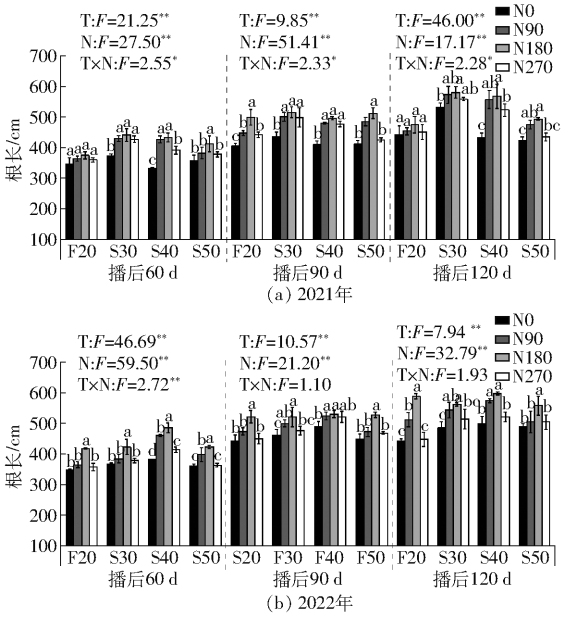


图 4　深松施氮处理下马铃薯关键生育期根长

Fig. 4　Root length of potato in key growth stage under subsoiling combined with nitrogen application

2.2.2　马铃薯根系活力

由表 1 可知，试验期间，随着生育期推进，马铃薯根系活力逐渐减小。耕作深度、施氮量对马铃薯播后 60 ~ 120 d(关键生育期)根系活力有极显著影响，二者交互对 2021 年播后 90 d 根系活力有显著影响，对播后 120 d 有极显著影响，对 2022 年播后 90 ~ 120 d 有极显著影响。深松施氮可显著影响马铃薯关键生育期的根系活力，其中深松深度 30 ~ 40 cm 结合施氮量 180 kg/hm^{2}处理提高效果最佳。

马铃薯播后 60 d，同一耕作深度下根系活力两年均以 N180 处理最高，与 N0 处理相比，2021 年和 2022 年分别显著提高 8.5% 和 5.0%；同一施氮量下 2021 年以 S30 处理最高，2022 年以 S40 处理最高，与 F20 处理相比，分别显著提高 8.3% 和 4.6%；二者交互，2021 年以 S30 × N180 处理最高，2022 年以 S40 × N180 处理最高。马铃薯播后 90 d，同一耕作深度下根系活力两年均以 N180 处理最高，与 N0 处理相比，分别显著提高 8.8% 和 12.5%；同一施氮量下 2021 年以 S30 处理最高，2022 年以 S40 处理最高，与 F20 处理相比，分别显著提高 3.9% 和 5.6%；二者交互，2021 年以 S30 × N180 处理最高，2022 年以 S40 × N180 处理最高，较 F20 × N0 处理分别显著提高 11.1% 和 16.0%。马铃薯播后 120 d，同一耕作深度下根系活力两年均以 N180 处理最高，与 N0 处理相比，分别显著提高 8.6% 和 18.8%；同一施氮量下，2021 年以 S30 处理最高，2022 年以 S40 处理最高，与 F20 处理相比，分别显著提高 8.6% 和 4.7%；二者交互，2021 年和 2022 年分别以 S30 × N180、S40 × N180 处理最高，较 F20 × N0 处理分别显著提高 15.7%、28.5%。

表 1　深松施氮下马铃薯关键生育期根系活力

Tab. 1　Root activity in key growth period of potato under subsoiling combined nitrogen fertilization

μg/(g·h)

耕作深度	施氮量	2021 年			2022 年		
		60 d	90 d	120 d	60 d	90 d	120 d
F20	N0	629.30^{b}	493.11^{c}	365.17^{b}	692.16^{a}	479.14^{c}	357.56^{c}
	N90	671.84^{a}	508.98^{b}	374.70^{ab}	702.00^{a}	501.37^{b}	405.49^{b}
	N180	685.49^{a}	536.60^{a}	375.97^{a}	718.19^{a}	527.08^{a}	422.00^{a}
	N270	668.35^{b}	493.43^{c}	371.52^{ab}	695.33^{a}	482.63^{c}	404.22^{b}
S30	N0	688.98^{c}	503.90^{b}	375.02^{c}	710.57^{a}	486.44^{d}	378.19^{d}
	N90	722.00^{ab}	534.38^{a}	394.38^{b}	719.46^{a}	532.48^{b}	435.65^{b}
	N180	746.44^{a}	547.71^{a}	422.63^{a}	747.40^{a}	554.70^{a}	444.22^{a}
	N270	717.87^{b}	508.98^{b}	381.68^{c}	711.21^{a}	505.17^{c}	393.11^{c}
S40	N0	676.92^{d}	499.78^{b}	375.33^{c}	719.14^{b}	503.59^{c}	374.7^{d}
	N90	713.43^{b}	538.51^{a}	387.71^{ab}	736.29^{ab}	525.17^{b}	431.84^{b}
	N180	740.73^{a}	544.22^{a}	395.02^{a}	761.68^{a}	555.65^{a}	459.46^{a}
	N270	711.52^{c}	504.22^{b}	378.51^{bc}	719.46^{b}	516.60^{bc}	397.87^{c}
S50	N0	647.71^{c}	493.75^{c}	366.76^{b}	703.9^{a}	477.87^{b}	377.24^{d}
	N90	674.38^{b}	509.30^{b}	371.52^{b}	717.24^{a}	544.54^{a}	411.52^{b}
	N180	695.02^{a}	537.56^{a}	415.33^{a}	739.78^{a}	552.16^{a}	441.37^{a}
	N270	664.86^{b}	504.54^{bc}	368.98^{b}	711.21^{a}	478.83^{b}	394.70^{c}
F	T	15.02**	14.66**	25.93**	3.36**	25.98**	47.45**
	N	10.39**	99.66**	63.48**	4.86**	140.78**	634.28**
	T × N	0.11	2.33*	8.25**	0.08	6.21**	17.68**

注：同列不同小写字母表示同一耕作深度下各施氮处理间差异显著($P<0.05$)；* 表示 $P<0.05$；** 表示 $P<0.01$。下同。

2.3　深松施氮对马铃薯产量的影响

由图 5 可知，耕作深度和施氮量对马铃薯产量有极显著影响，二者交互仅对 2022 年马铃薯产量有极显著影响。深松深度 30 ~ 40 cm 结合施氮量 180 kg/hm^{2}模式可显著提高马铃薯产量。

同一耕作深度下，两年 N90、N180 和 N270 处理马铃薯产量较 N0 处理显著增加，2021 年分别显著增加 19.7%、26.2% 和 9.5%，2022 年分别显著增加

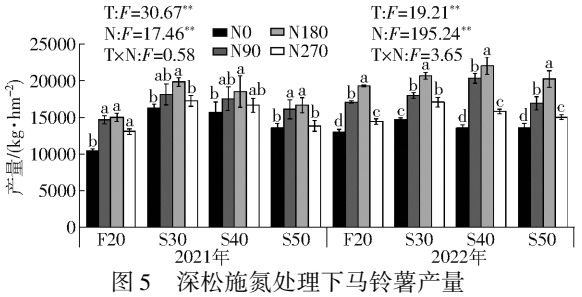


图 5 深松施氮处理下马铃薯产量

Fig. 5 Yield of potato under subsoiling combined nitrogen application

32.2%、50.3%和 14.0%;同一施氮量下,与 F20 处理相比,2021 年 S30、S40 和 S50 处理分别显著增加 34.7%、28.5%和 13.1%,2022 年 S30 和 S40 处理分别显著增加 10.4%和 12.4%;二者交互,2021 年以 S30×N180 处理产量最高,2022 年以 S40×N180 处理产量最高,较 F20×N0 处理分别显著提高 90.0%和 69.6%。

2.4 深松施氮对氮素利用特征的影响

2.4.1 马铃薯各器官氮素含量

由图 6 可知,马铃薯播后 150 d(收获期)各器官氮素累积量由大到小依次为块茎、叶部、茎部、根部。深松施氮可显著提高马铃薯各器官氮素累积量,其中以深松深度 30~40 cm 结合施氮量 180 kg/hm² 处理最高。

马铃薯根部氮素累积量,同一耕作深度下两年均以 N180 处理最高,2021 年和 2022 年分别较 N0 处理显著增加 107.6%和 111.8%;同一施氮量下两年均以 S40 处理最高,分别较 F20 处理显著提高 44.3%和 44.8%;二者交互,两年均以 S40×N180 处理最高,分别较 F20×N0 处理显著提高 220.0%和 166.9%。马铃薯茎部氮素累积量,同一耕作深度下两年均以 N180 处理最高,分别较 N0 处理显著增加 69.6%和 71.5%;同一施氮量下 2021 年以 S30 处理最高,2022 年以 S40 处理最高,分别较 F20 处理显著提高 41.5%和 23.6%;二者交互,2021 年以 S30×N180 处理最高,2022 年以 S40×N180 处理最高,分别较 F20×N0 处理显著提高 117.7%和 95.3%。马铃薯叶部氮素累积量,同一耕作深度下两年均以 N180 处理最高,分别较 N0 处理显著增加 86.2%和 59.4%;同一施氮量下 2021 年以 S30 处理最高,2022 年以 S40 处理最高,分别较 F20 处理显著提高 54.7%和 18.0%;二者交互,2021 年以 S30×N180 处理最高,2022 年以 S40×N180 处理最高,分别较 F20×N0 处理显著提高 136.3%和 81.0%。马铃薯块茎部氮素累积量,同一耕作深度下两年均以 N180 处理最高,分别较 N0 处理显著增加

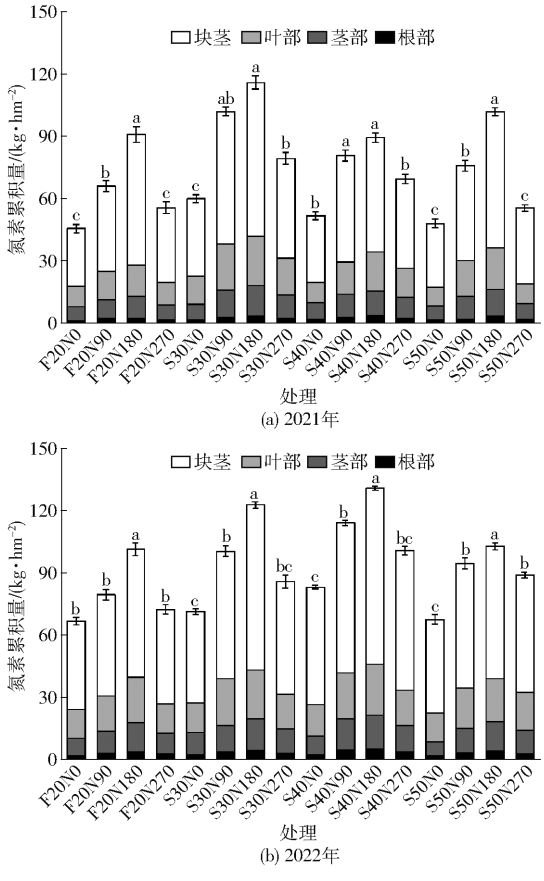


图 6 深松施氮下马铃薯各器官氮素累积量

Fig. 6 Nitrogen accumulation in each organ of potato under subsoiling combined nitrogen application

91.1%和 53.9%;同一施氮量下 2021 年以 S30 处理最高,2022 年以 S40 处理最高,分别较 F20 处理显著提高 33.5%和 41.3%;二者交互,2021 年以 S30×N180 处理最高,2022 年以 S40×N180 处理最高,分别较 F20×N0 处理显著提高 169.0%和 97.8%。

2.4.2 马铃薯氮素利用效率

由表 2 可知,耕作深度和施氮量对马铃薯氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥利用率有极显著影响,二者交互对 2022 年氮肥农学利用率、氮肥偏生产力有极显著影响,对 2021 年氮肥农学利用率和氮肥利用率和 2022 年氮肥利用率有显著影响。深松深度 30~40 cm 结合施氮量 90~180 kg/hm² 可显著提高马铃薯氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥利用率。

同一耕作深度下,2021 年和 2022 年 N90 处理均可显著提高氮肥农学利用率和氮肥偏生产力,N180 处理较 N90 处理分别显著提高氮肥利用率 36.0%和 49.1%;同一施氮量下,2021 年 S30 处理氮肥农学利用率和氮肥偏生产力较 F20 处理分别显著提高 27.4%和 146.4%,2022 年 S40 处理对提高氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥利用率效果最佳,较 F20 处理分别显著提高 51.8%、16.1%和

表 2　深松施氮下马铃薯氮素利用效率

Tab. 2　Nitrogen use efficiency of potato under subsoiling combined nitrogen application

耕作深度	施氮量	2021 年			2022 年		
		氮肥农学利用率/(kg·kg^{-1})	氮肥偏生产力/(kg·kg^{-1})	氮肥利用率/%	氮肥农学利用率/(kg·kg^{-1})	氮肥偏生产力/(kg·kg^{-1})	氮肥利用率/%
F20	N0						
	N90	46.94^{a}	162.69^{a}	4.52^{a}	45.37^{a}	189.35^{a}	6.41^{a}
	N180	25.41^{b}	83.29^{b}	6.95^{a}	35.05^{a}	107.04^{b}	15.86^{a}
	N270	9.75^{c}	48.33^{c}	1.13^{b}	5.37^{b}	53.37^{c}	2.77^{b}
S30	N0						
	N90	21.02^{a}	201.02^{a}	11.24^{a}	37.36^{a}	199.72^{a}	11.03^{a}
	N180	20.09^{a}	110.09^{b}	13.54^{a}	33.50^{a}	114.68^{b}	15.08^{a}
	N270	3.86^{b}	63.85^{c}	6.27^{b}	9.08^{b}	63.19^{c}	3.31^{b}
S40	N0						
	N90	20.79^{a}	194.67^{a}	7.28^{ab}	75.05^{a}	225.42^{a}	14.46^{ab}
	N180	15.72^{a}	102.66^{b}	10.24^{a}	46.94^{b}	122.13^{b}	18.35^{a}
	N270	3.47^{b}	61.43^{c}	5.30^{b}	8.32^{c}	58.44^{c}	6.02^{b}
S50	N0						
	N90	28.24^{a}	178.7^{a}	9.65^{b}	37.41^{a}	187.73^{a}	12.01^{b}
	N180	17.15^{b}	92.38^{b}	13.69^{a}	37.18^{a}	112.34^{b}	16.18^{a}
	N270	0.94^{c}	51.10^{c}	1.20^{c}	5.48^{b}	55.58^{c}	10.21^{c}
F	T	12.88**	10.28**	18.87**	15.30**	18.90**	10.90**
	N	64.08**	400.43**	57.52**	145.66**	1 809.08**	81.93**
	T × N	3.01*	0.60	3.20*	6.31**	6.27**	3.30*

55.0%；二者交互，2021 年 F20 × N90 处理氮肥农学利用率最高，S30 × N90 处理氮肥偏生产力最高，S50 × N180 处理氮肥利用率最高，较 F20 × N90 处理显著提高 202.9%；2022 年 S40 × N90 处理氮肥农学利用率和氮肥偏生产力最高，较 F20 × N90 处理分别显著提高 65.4% 和 19.1%，S40 × N180 处理氮肥利用率最高，较 F20 × N90 处理显著提高 186.3%。

2.5　耕作深度和施氮量与马铃薯产量及氮肥利用率间的关系

对耕作深度和施氮量与马铃薯产量及氮肥利用率间拟合发现（图 7），所有模型决定系数 R^2 > 0.87，表明回归方程可靠。两年马铃薯产量和氮肥利用率达到最大值时所对应的耕作深度和施氮量不同。基于两年的综合评估，最终确定深松施氮措施下马铃薯高产和氮肥高效利用的最优耕作深度和施氮量分别为 35.1 ~ 37.2 cm 和 151.5 ~ 160.7 kg/hm^2。从产量和氮素利用效率综合考量，建议在宁南旱作马铃薯生产中采用深松深度 35 ~ 40 cm 结合施氮量 151 ~ 180 kg/hm^{2}可使马铃薯增产和氮高效利用。

3　讨论

3.1　深松施氮对土壤水氮环境的影响

适宜的保护性耕作方式配适宜施氮能改善土壤耕层结构，提高土壤蓄水能力[7]。在施氮条件下，深松深度 30 ~ 40 cm 在保持土壤蓄水量方面较翻耕和免耕处理效果更佳，且低施氮量处理的土壤蓄水量高于高施氮量处理[8]。本研究发现，在马铃薯关键生育期（播后 60 ~ 120 d），深松结合不施氮处理可显著提高土壤蓄水量和含水率，其中深松 50 cm 条件下蓄水效果最佳。深入分析其原因：与翻耕深度 20 cm 和深松其他深度相比，深松 50 cm 可最大程度增加耕作层，为土壤水分入渗创造有效的输送通道，增加水渗透能力[9]，促进水分下渗，能增加深层土壤水分的蓄积[10]，特别是显著增加深层（60 cm）土壤含水率[11]。然而，施氮处理较不施氮会显著降低土壤贮水量[12]。赵若含[13]研究发现，当深松深度为 30 cm 时，更有利于改善土壤氮素含量，且随施氮量增加，土壤氮素累积越显著。而 ZHANG 等[14]研究表明，同一耕作类型下，当施氮量超过一定阈值时，作物无法继续吸收氮素。在本研究中，深松深度 30 ~ 40 cm 结合不同施氮量均可有效提高土壤氮素含量，其中施氮量 270 kg/hm^{2}处理氮素含量最高。这表明施氮量 270 kg/hm^{2}还没有达到该地区土壤氮素吸收阈值，仍可最大程度增加土壤中氮含量。且深松深度 30 ~ 40 cm 相较于翻耕和深松深度 50 cm，可使土壤中氧气含量更高，从而提高土壤氮素转化微生物作用强度、相关酶活性和土壤供氮能力[15]。

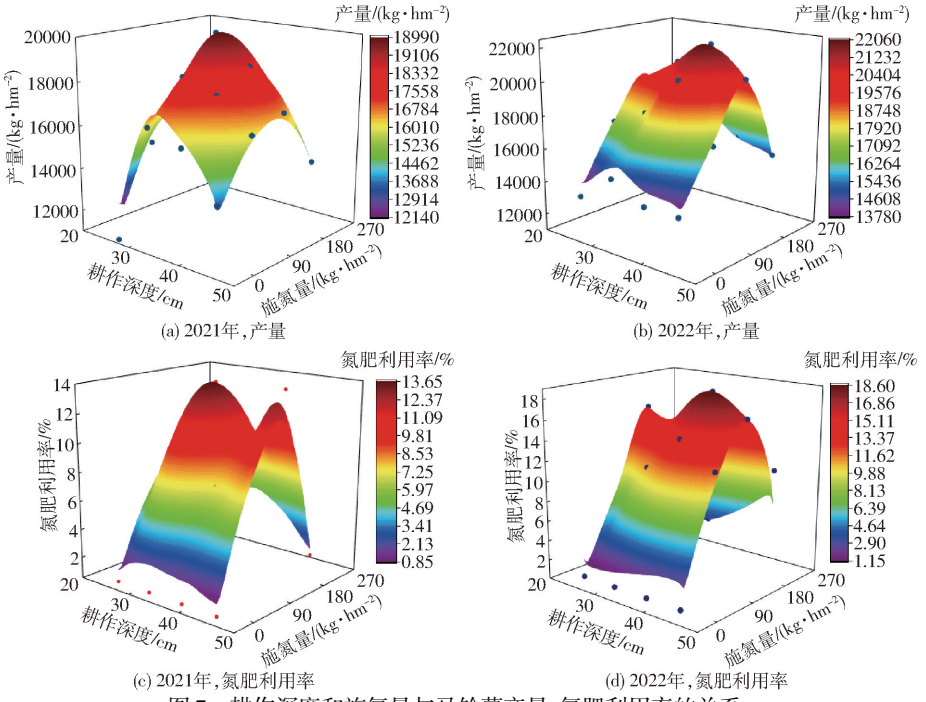


图 7 耕作深度和施氮量与马铃薯产量、氮肥利用率的关系

Fig. 7 Relationship of tillage depth and nitrogen application rate with yield, nitrogen use efficiency of potato

3.2 深松施氮对马铃薯根系生长的影响

张凤路等[16]研究发现,深松深度 40 cm 结合施氮量 225 kg/hm² 可为根系提供良好的生长环境,促进根系发育。于晓芳等[17]研究表明,深松深度 30 cm 结合施氮量 440 kg/hm² 处理对玉米根系生长状况产生显著影响,改善了深层根系生长状况,减缓深层根系衰老。本研究发现,施氮量过高或过低均会影响根系发育,施氮量 180 kg/hm² 结合深松 30 ~ 40 cm 可显著提高马铃薯关键生育期(播后 60 ~ 120 d)根长和根系活力。这是因为:①适宜的氮肥供应,可以促进根系健康生长,进而增加根系对土壤水分和养分的吸收,以满足植株根系生长所需[18]。②翻耕耕层较浅,根系下扎受阻,而深松 50 cm 耕层较深,使土壤中含氧量降低,不利于根系生长,而深松深度 30 ~ 40 cm 通透性强,氧气含量高,可减少根系穿透阻力,利于根系下扎,促进根系发育,从而提高根长和根系活力[19]。本研究还发现,随着生育期推进,深松施氮对生育前期马铃薯根系活力的影响尤其重要。探讨其原因:马铃薯在现蕾期(播后 60 d)根系活力达到峰值,随后根系开始衰老,而深松施氮可改善耕层结构和生育前期土壤水肥状况,为根系发育提供适宜的生长环境,减缓深层根系衰老,从而延缓根系活力降低[17]。

3.3 深松施氮对马铃薯产量及氮素利用的影响

有研究发现,深松 35 cm 可影响土壤水分状况,进而与氮肥互作影响小麦产量形成,与深松匹配的适宜氮肥用量因降水年型而异,欠水年配施氮肥 180 kg/hm²,丰水年配施氮肥 240 kg/hm² 效果最佳[20]。本研究发现,施氮量 180 kg/hm² 结合不同深松深度均可有效提高马铃薯产量,2021 年以深松深度 30 cm 处理最高,2022 年以深松深度 40 cm 处理最高。这是因为适量施氮可提高土壤养分供应能力,促进营养器官氮素向生殖器官转移,生殖器官养分供给充足,籽粒干物质积累较多,从而提高产量[21]。在两年研究中,深松 30 ~ 40 cm 有利于作物根系深扎,促进对水分和养分吸收,从而提高产量[22]。这是因为适当增加深松深度,可加深耕层,提高其接纳雨水能力,减少蒸发,提高产量[23]。

通过对耕作深度、施氮量与马铃薯产量、氮肥利用率的关系拟合发现,随着耕作深度和施氮量增加,马铃薯产量和氮肥利用率均呈先增加后降低趋势,其中深松深度 35.1 ~ 37.2 cm 结合施氮量 151.5 ~ 160.7 kg/hm² 时,可协同实现马铃薯理论产量和氮肥利用率较高。原因为:①耕作过浅会导致耕层降低,不利于根系生长,耕作过深会使土壤水肥下渗严重,超过了作物根系吸收水肥的主要范围,抑制根系生长,从而降低产量和氮肥利用率[6]。②施氮量过低,养分不足,影响作物生长;施氮量过高,会造成氮素过剩,影响作物生长环境的同时,降低作物对氮素的吸收能力,影响产量形成[24]。③适宜耕作深度结合适宜施氮量,可以促进根系生长,进而提高对氮素的吸收,影响块茎产量和氮肥利用率的协同提升[25]。

有研究表明,深松处理能缓解生殖器官与营养

器官的氮素竞争，减轻生殖器官氮素积累对营养器官氮素转运的依赖，随耕作深度增加深松作用显著，在生育后期表现更明显[26]。与不深松相比，深松深度 35 cm 可显著提高玉米收获期各器官中氮素比例，且随着施氮量增加，玉米单株氮素累积量逐渐增加[24]。郝杰[27]研究认为，深松施氮可提高小麦成熟期各器官氮素积累量，随着施氮量增加，成熟期各器官氮素积累量均呈先增加后降低。本研究结果表明，随着施氮量增加，各器官氮素累积量均呈先增加后降低趋势，这与郝杰[27]研究结果一致。同时发现，在施氮量 180 kg/hm^{2}时达到峰值，结合深松深度 30～40 cm 提升效果最佳。原因为：①适宜施氮量能为作物提供充足的氮素养分，供作物吸收利用，但当施氮量过高时，大量氮素过剩，使氮的有效性降低，同时抑制作物的吸氮能力，使其氮素累积量降低[28]。②翻耕未打破犁底层，不利于根系生长，而适宜深松深度（30～40 cm），提高土壤水分和养分含量，改善土壤微生物活性，有利于根系生长，进而增强根系对氮素的吸收能力，改善作物氮素积累转运特性[29]。

提高氮肥利用效率、探究最佳的施肥方式是目前减少氮肥污染、保护环境亟待解决的主要问题[30]。有研究发现，随施氮量增加，作物氮肥偏生产力、氮肥吸收利用率和氮肥农学利用率呈降低趋势[24]；深松施氮对小麦氮效率有显著调节作用，欠水年深松深度 35 cm 结合施氮量 180 kg/hm^{2}可提高氮肥农学效率和利用率[31]。本研究也发现，随耕作深度和施氮量增加，氮肥农学利用率和氮肥偏生产力均逐渐降低，而氮肥利用率先增加后降低，当施氮量为 180 kg/hm^{2}时达到最高，其中以深松深度 30～40 cm 结合施氮量 90～180 kg/hm^{2}处理影响最为显著。这是因为适宜深松施氮可促进根系生长，进而提高植株氮的转化利用效率[32]，但马铃薯吸氮量有限，过量施氮会造成植株氮素残留，致使作物的氮素利用效率降低[33]。然而，本研究仅从土壤水氮、根系特征及氮素利用入手，探讨深松施氮措施下马铃薯根系生长和氮素利用特征，但作物增产和氮高效利用还与土壤物理性质（土壤结构、温度）、酶活性、微生物等肥力因素有关，且两年试验期间均属于枯水年，并未涉及到其他降水年型（平水年、丰水年），因此仍需开展长期定位试验研究，以进一步明确协同实现旱作马铃薯增产和氮素高效利用的深松施氮措施。

4　结束语

与翻耕不施氮相比，深松深度 50 cm 结合不施氮可有效提高马铃薯关键生育期（播后 60～120 d）0～100 cm 层土壤蓄水量和 0～60 cm 层土壤含水率。深松施氮可显著提高收获期（播后 150 d）0～60 cm 层土壤全氮和碱解氮含量，其中深松深度 30～50 cm 结合施氮量 180 kg/hm^{2}提升效果最佳。在马铃薯关键生育期，深松深度 30～40 cm 结合施氮量 180 kg/hm^{2}对改善根长及根系活力效果最优。深松施氮可促进马铃薯收获期各器官氮素累积，以深松深度 30～40 cm 结合施氮量 180 kg/hm^{2}效果最佳。深松深度 30～40 cm 结合施氮量 90～180 kg/hm^{2}可显著提高马铃薯产量、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥利用率。通过对耕作深度和施氮量与马铃薯产量、氮肥利用率关系拟合发现，当耕作深度为 35.1～37.2 cm 结合施氮量 151.5～160.7 kg/hm^{2}时，可协同实现马铃薯高产和氮肥高效利用。综上，深松施氮可改善土壤水氮环境，促进根系生长发育和对氮素的吸收利用，进而提高马铃薯产量和氮肥利用率，建议在宁南旱作马铃薯生产中采用深松深度 35～40 cm 结合施氮量 151～180 kg/hm^2，可使马铃薯增产和氮高效利用。

参　考　文　献

[1] 张万锋，杨树青，孙多强，等. 秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响[J]. 环境科学，2021，42(2)：786－795.
ZHANG Wanfeng，YANG Shuqing，SUN Duoqiang，et al. Effects of straw mulching and nitrogen reduction on soil nitrogen distribution and groundwater nitrogen pollution[J]. Environmental Science，2021，42(2)：786－795.（in Chinese）

[2] 郭家萌，刘振朝，高强，等. 深松对玉米产量和养分吸收的影响[J]. 水土保持学报，2016，30(2)：249－254.
GUO Jiameng，LIU Zhenchao，GAO Qiang，et al. Effects of submerging on yield and nutrient uptake of maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2016，30(2)：249－254.（in Chinese）

[3] 张龙，李简，赵富贵，等. 免耕或深松结合秸秆覆盖提升土壤碳氮水含量和马铃薯产量的协同效应[J]. 植物营养与肥料学报，2023，29(1)：45－56.
ZHANG Long，LI Jian，ZHAO Fugui，et al. Synergistic effect of no-tillage or sub-soiling tillage with straw mulching increasing soil carbon，nitrogen and water storage and potato yield[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2023，29(1)：45－56.（in Chinese）

[4] 银敏华，李援农，李昊，等. 氮肥运筹对夏玉米根系生长与氮素利用的影响[J]. 农业机械学报，2016，47(6)：129－138.
YIN Minhua，LI Yuannong，LI Hao，et al. Effects of nitrogen application rates on root growth and nitrogen use of summer maize

[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 129 – 138. (in Chinese)

[5] 楚光红, 章建新, 高阳, 等. 施氮量对滴灌超高产春玉米根系时空分布及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 156 – 160.
CHU Guanghong, ZHANG Jianxin, GAO Yang, et al. Effects of nitrogen application rate on root spatial and temporal distribution and yield of spring maize with super high yield under drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(3): 156 – 160. (in Chinese)

[6] 梁艳妃, 孙敏, 高志强, 等. 夏闲期深松耕作和氮肥用量对旱地小麦土壤水分及氮素利用的影响[J]. 山西农业大学学报, 2018, 38(9): 16 – 23.
LIANG Yanfei, SUN Min, GAO Zhiqiang, et al. Effects of subtillage and nitrogen fertilizer on soil water and nitrogen utilization of wheat in dry land[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2018, 38(9): 16 – 23. (in Chinese)

[7] 张龙. 耕作深度结合施氮对旱地土壤理化性质、马铃薯产量及品质的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
ZHANG Long. Effects of tillage depth combined with nitrogen application on soil physical and chemical properties, potato yield and quality in dryland[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023. (in Chinese)

[8] MURALI K, DARAPUNENI I, OMOLOLU J, et al. Tillage and nitrogen rate effects on corn production and residual soil characteristics[J]. Agronomy Journal, 2019, 111(3): 524 – 1532.

[9] KUANG N K, TAN C D, HAN H F, et al. Effects of sub-soiling before winter wheat on water consumption characteristics and yield of summer maize on the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2020, 227: 105786.

[10] 王玉凤, 李庆, 张翼飞, 等. 耕作方式对三江平原玉米生长发育及水分利用影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(3): 116 – 125.
WANG Yufeng, LI Qing, ZHANG Yifei, et al. Effects of tillage methods on growth, development and water use of maize in Sanjiang Plain[J]. Journal of Maize Science, 2022, 30(3): 116 – 125. (in Chinese)

[11] SUN M, GAO Z Q, ZONG Y Z, et al. Contribution of sub-soiling in fallow period and nitrogen fertilizer to the soil water balance and grain yield of dry-land wheat[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2015, 17(1): 175 – 180.

[12] 李敖, 张元红, 温鹏飞, 等. 耕作、施氮和密度及其互作对旱地春玉米土壤水分及产量形成的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(10): 1959 – 1970.
LI Ao, ZHANG Yuanhong, WEN Pengfei, et al. Effects of tillage, nitrogen application, planting density and their interaction on soil moisture and yield formation of spring maize in dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(10): 1959 – 1970. (in Chinese)

[13] 赵若含. 耕作与施氮对麦玉两熟制农田土壤特性和产量的影响机制[D]. 新乡: 河南科技学院, 2021.
ZHAO Ruohan. Effect mechanism of tillage and nitrogen application on soil characteristics and yield of wheat and jade double-cropping farmland[D]. Xinxiang: Henan University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)

[14] ZHANG X D, LI Z M, SIDDIQUE K H M, et al. Increasing maize production and preventing water deficits in semi-arid areas: a study matching fertilization with regional precipitation under mulch planting[J]. Agricultural Water Management, 2020, 241: 106347.

[15] 张瑞富, 杨恒山, 张玉芹, 等. 深松对春玉米根系分布及氮素积累与利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 176 – 181.
ZHANG Ruifu, YANG Hengshan, ZHANG Yuqin, et al. Effects of subsoiling on root distribution, nitrogen accumulation and utilization of spring maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 176 – 181. (in Chinese)

[16] 张凤路, 刘鑫, 张怡明, 等. 施氮和深松对春玉米根系性状的影响研究[J]. 华北农学报, 2012, 27(增刊1): 309 – 314.
ZHANG Fenglu, LIU Xin, ZHANG Yiming, et al. Effects of nitrogen application and subsoiling on root traits of spring maize [J]. Acta Agriculurae Boreali-Sinica, 2012, 27(Supp. 1): 309 – 314. (in Chinese)

[17] 于晓芳, 高聚林, 叶君, 等. 深松及氮肥深施对超高产春玉米根系生长,产量及氮肥利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(1): 114 – 119.
YU Xiaofang, GAO Julin, YE Jun, et al. Effects of subsoiling with nitrogen deep placement on root growth, grain yield and nitrogen use efficiency of super high-yield spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(1): 114 – 119. (in Chinese)

[18] 丁世杰, 熊淑萍, 马新明, 等. 耕作方式与施氮量对小麦–玉米复种系统玉米季土壤氮素转化及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 142 – 150.
DING Shijie, XIONG Shuping, MA Xinming, et al. Effects of tillage method and nitrogen application rate on soil nitrogen conversion and yield in maize season under wheat – maize multiple cropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(1): 142 – 150. (in Chinese)

[19] 苗芳芳. 不同耕作深度对土壤结构、水分及作物生长的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2021.
MIAO Fangfang. Effects of different tillage depths on soil structure, water content and crop growth[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021. (in Chinese)

[20] 吴金芝, 黄明, 李友军, 等. 耕作方式和氮肥用量对旱地小麦产量、水分利用效率和种植效益的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 264 – 271.
WU Jinzhi, HUANG Ming, LI Youjun, et al. Effects of tillage method and nitrogen fertilizer amount on yield, water use efficiency and planting benefit of wheat in dry land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 264 – 271. (in Chinese)

[21] 罗上轲，刘婕，叶开梅，等. 覆膜方式与施氮量对春玉米产量、干物质和氮素积累与转运的影响[J]. 玉米科学，2020，28(4)：146－154，164.
LUO Shangke，LIU Jie，YE Kaimei，et al. Effects of film mulching method and nitrogen application amount on yield，dry matter and nitrogen accumulation and transport of spring maize[J]. Journal of Maize Science，2020，28(4)：146－154，164.（in Chinese）

[22] 李荣，鄢慧芳，张龙，等. 不同耕作措施对宁南地区土壤物理性质及作物产量的影响[J]. 中国农业科学，2023，56(18)：3543－3555.
LI Rong，YAN Huifang，ZHANG Long，et al. Effects of different tillage practices on soil physical properties and crop yield in southern Ningxia[J]. Scientia Agricultura Sinica，2023，56(18)：3543－3555.（in Chinese）

[23] 于淑婷，赵亚丽，王育红，等. 轮耕模式对黄淮海冬小麦-夏玉米两熟区农田土壤改良效应[J]. 中国农业科学，2017，50(11)：2150－2165
YU Shuting，ZHAO Yali，WANG Yuhong，et al. Effect of rotating tillage model on farmland soil improvement in Huang－Huai－Hai winter wheat－summer corn double cropping area[J]. Scientia Agricultura Sinica，2017，50(11)：2150－2165.（in Chinese）

[24] 梁熠，马琨，朱海燕，等. 深松与施氮量对春玉米产量及氮素吸收利用率的影响[J]. 玉米科学，2014，22(2)：129－134.
LIANG Yi，MA Kun，ZHU Haiyan，et al. Effects of subsoiling and nitrogen application rate on yield and nitrogen uptake and use efficiency of spring maize[J]. Journal of Maize Science，2014，22(2)：129－134.（in Chinese）

[25] 熊淑萍，王静，王小纯，等. 耕作方式及施氮量对砂姜黑土区小麦氮代谢及籽粒产量和蛋白质含量的影响[J]. 植物生态学报，2014，38(7)：767－775.
XIONG Shuping，WANG Jing，WANG Xiaochun，et al. Effects of tillage method and nitrogen application rate on nitrogen metabolism，grain yield and protein content of wheat in Shajiang black soil[J]. Chinese Journal of Plant Echology，2014，38(7)：767－775.（in Chinese）

[26] 尹斌，高聚林，王志刚，等. 高产春玉米灌浆期碳氮积累、转运及叶片衰老特性对深松深度的响应[J]. 玉米科学，2014，22(2)：98－103
YIN Bin，GAO Julin，WANG Zhigang，et al. Response on carbon-nitrogen accumulation and transportation and leaf senescence characters of high yield spring maize by subsoiling depth in filling stage[J]. Journal of Maize Sciences，2014，22(2)：98－103.（in Chinese）

[27] 郝杰. 耕作施氮对旱地小麦氮素利用及根际 AMF 群落的影响[D]. 太原：山西农业大学，2020.
HAO Jie. Effects of tillage nitrogen application on nitrogen utilization and rhizosphere AMF community of dryland wheat[D]. Taiyuan：Shanxi Agricultural University，2020.（in Chinese）

[28] 王克秀，汪翠存，唐铭霞，等. 氮素水平对雾培马铃薯氮磷钾吸收、积累和分配规律的影响[J]. 西南农业学报，2020，33(12)：2852－2861.
WANG Kexiu，WANG Cuicun，TANG Mingxia，et al. Effects of nitrogen levels on the absorption，accumulation and distribution of nitrogen，phosphorus and potassium in aeroponics potatoes[J]. Southwest Agricultural Journal，2020，33(12)：2852－2861.（in Chinese）

[29] 李文倩，韩明明，张海军，等. 耕作措施和施氮量对小麦籽粒产量、籽粒蛋白质含量和氮素利用率的影响[J]. 中国农学通报，2024，40(14)：1－12.
LI Wenqian，HAN Mingming，ZHANG Haijun，et al. Effects of tillage practices and nitrogen rates on grain yield，grain protein content and nitrogen use efficiency in wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2024，40(14)：1－12.（in Chinese）

[30] 周昌明，李援农，陈朋朋. 一次性施肥模式对覆膜夏玉米产量与氮素利用的影响[J]. 农业机械学报，2020，51(10)：329－337.
ZHOU Changming，LI Yuannong，CHEN Pengpeng. Effects of single application of fertilizer on yield and nitrogen utilization of mulching summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(10)：329－337.（in Chinese）

[31] 黄明，吴金芝，李友军，等. 耕作方式和氮肥用量对旱地小麦产量、蛋白质含量和土壤硝态氮残留的影响[J]. 中国农业科学，2021，54(24)：5206－5219.
HUANG Ming，WU Jinzhi，LI Youjun，et al. Effects of tillage method and nitrogen fertilizer amount on wheat yield，protein content and soil nitrate nitrogen residue in dry land[J]. Scientia Agricultura Sinica，2021，54(24)：5206－5219.（in Chinese）

[32] 王静，王小纯，熊淑萍，等. 耕作方式对砂姜黑土小麦氮代谢及氮素利用效率的影响[J]. 麦类作物学报，2014，34(8)：1111－1117.
WANG Jing，WANG Xiaochun，XIONG Shuping，et al. Effects of tillage methods on nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency of wheat in sandy ginger black soil[J]. Journal of Triticeae Crops，2014，34(8)：1111－1117.（in Chinese）

[33] 曹哲，何文寿，侯贤清，等. 不同施氮量对马铃薯养分吸收及产量的影响[J]. 西南农业学报，2017，30(7)：1600－1605.
CAO Zhe，HE Wenshou，HOU Xianqing，et al. Effects of nitrogen fertilizer application on nutrient absorption and yield of potato[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences，2017，30(7)：1600－1605.（in Chinese）