网络出版时间:2026-05-11 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.11.013

深松结合地膜覆盖对旱作马铃薯根系特征及其产量的影响

马兰兰[1],韩固[2],侯贤清[1],李惠霞[1],李荣[1]

(1 宁夏大学 农学院,宁夏 银川 750021;2 中国林业科学研究院 沙漠林业实验中心,内蒙古 磴口 015200)

[摘 要] 【目的】探讨深松结合地膜覆盖对旱作马铃薯生长和块茎产量的影响,为宁夏南部旱区马铃薯高产栽培提供技术参考。【方法】于2021—2022年连续2个干旱年型下,以'青薯9号'马铃薯品种为供试对象,在宁夏南部旱区进行大田双因素裂区定位试验,主因素设翻耕15 cm(T_{15})及深松30 cm(T_{30})、40 cm(T_{40})和50 cm(T_{50})4个耕作水平,副因素设普通地膜(M_D)、可降解渗水地膜(M_F)、秸秆纸膜(M_J)覆盖及不覆盖(M_B)4个处理水平,以翻耕15 cm不覆盖($T_{15}M_B$)为对照,测定不同组合处理下旱作马铃薯关键生育期(现蕾期、块茎形成期和块茎膨大期)的土壤蓄水量、根系形态和生理特征、干物质积累量、块茎产量及商品薯率。【结果】(1)马铃薯关键生育期0~100 cm土层土壤蓄水量在2年块茎形成期和块茎膨大期均以$T_{30}M_J$处理最高,在2021和2022年块茎膨大期分别较对照提高39.21%和25.96%。(2)马铃薯块茎形成期至块茎膨大期根表面积、根体积、根系活跃吸收面积2年均以$T_{40}M_J$处理最优,块茎膨大期根表面积在2021和2022年分别较对照增加14.37%和27.56%,根体积分别较对照增加46.63%和46.77%,根系活跃吸收面积分别较对照增加74.79%和41.71%;块茎形成期至块茎膨大期根系活力在2021和2022年分别以$T_{30}M_J$和$T_{40}M_J$处理最优,块茎膨大期分别较同期对照增加89.32%和77.38%。(3)各关键生育期地上部干物质累积量在2021和2022年分别以$T_{30}M_J$和$T_{40}M_J$最高,块茎膨大期分别较同期对照增加48.01%和37.90%。块茎形成期至块茎膨大期地下部干物质累积量2年均以$T_{30}M_J$最高,块茎膨大期在2021和2022年分别较对照增加80.77%和55.06%。(4)马铃薯块茎产量和商品薯率2年均以$T_{40}M_J$最高,2021年较对照分别提高106.24%和13.91%,2022年分别提高67.42%和6.43%。(5)2年现蕾期土壤蓄水量、根系活力和地上部干物质累积量均对马铃薯块茎产量形成有显著影响,但土壤蓄水量和地上部干物质累积量对产量的影响程度在年际间存在差异,2021年土壤蓄水量的影响更大,而2022年地上部干物质累积量的影响更突出。【结论】干旱年型下,采用深松30~40 cm结合秸秆纸膜覆盖的栽培模式,可显著提高宁夏南部旱区马铃薯关键生育期的土壤蓄水量,促进根系生长发育,加速植株地上部和地下部干物质累积,进而显著提升马铃薯块茎产量和商品薯率。

[关键词] 旱作马铃薯;干旱年型;深松结合地膜覆盖;根系特征;马铃薯产量;宁南旱区

[中图分类号] S532;S342.1 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)11-0135-13

Effects of subsoiling combined with plastic film mulching on root characteristics and yield of rainfed potatoes

MA Lanlan[1],HAN Gu[2],HOU Xianqing[1],LI Huixia[1],LI Rong[1]

(1 *College of Agriculture,Ningxia University,Yinchuan,Ningxia* 750021,*China*;2 *Experimental Center of Desert Forestry,Chinese Academy of Forestry,Dengkou,Inner Mongolia* 015200,*China*)

Abstract:【Objective】The study aims to explore the effects of subsoiling combined with plastic mulching on the growth and tuber yield of rainfed potatoes,thereby providing a technical reference for high-yield potato

[收稿日期] 2025-08-08 [修回日期] 2026-02-27

[基金项目] 国家自然科学基金项目(32160515,31860362);宁夏自然科学基金项目(2025AAC030184,2025AAC030238)

[作者简介] 马兰兰(1996—),女(回族),宁夏固原人,在读硕士,主要从事旱地保护性耕作技术研究。E-mail:17341264585@163.com

[通信作者] 李荣(1984—),女,甘肃天水人,副教授,博士,主要从事旱作节水技术研究。E-mail:lironge_mail@126.com

cultivation in the dryland area of southern Ningxia.【Method】A two-factor split-plot field experiment was conducted in the dryland area of southern Ningxia during two consecutive drought years from 2021 to 2022. Potato cultivar 'Qingshu 9' was used as the test culticar. The main plots included four tillage levels: conventional tillage at 15 cm (T_{15}) and subsoiling at 30 cm (T_{30}), 40 cm (T_{40}), and 50 cm (T_{50}). The subplots consisted of four mulching treatments: conventional plastic film (M_D), biodegradable water-permeable film (M_F), straw-based paper film (M_J), and no mulching (M_B). Conventional tillage at 15 cm with no mulching ($T_{15}M_B$) was used as the control. Soil water storage, root morphological and physiological characteristics, dry matter accumulation, tuber yield, and marketable tuber rate were measured during the key growth stages (bud appearance stage, tuber initiation stage, and tuber bulking stage) of rainfed potatoes under the combined treatments.【Result】(1) In both 2021 and 2022, the $T_{30}M_J$ treatment resulted in the highest soil water storage in the 0—100 cm layer during the tuber initiation and tuber bulking stages. Specifically, during the tuber bulking stage, it increased soil water storage by 39.21% and 25.96% compared to the control in 2021 and 2022, respectively. (2) Root surface area, root volume, and root active absorption area during the tuber initiation to tuber bulking stages were highest under the $T_{40}M_J$ treatment in both 2021 and 2022. During the tuber bulking stage, root surface area increased by 14.37% and 27.56% compared to the control in 2021 and 2022, respectively; root volume increased by 46.63% and 46.77%, respectively; and root active absorption area increased by 74.79% and 41.71%, respectively. During the tuber initiation to tuber bulking stages, the highest root activity was recorded in the $T_{30}M_J$ treatment in 2021 and the $T_{40}M_J$ treatment in 2022. During the tuber bulking stage, root activity increased by 89.32% and 77.38% compared to the control in 2021 and 2022, respectively. (3) During the key growth stages, the highest shoot dry matter accumulation was recorded in the $T_{30}M_J$ treatment in 2021 and the $T_{40}M_J$ treatment in 2022. During the tuber bulking stage, it increased by 48.01% and 37.90% compared to the control in 2021 and 2022, respectively. Root dry matter accumulation during the tuber initiation and tuber bulking stages was highest under the $T_{30}M_J$ treatment in both years. During the tuber bulking stage, it increased by 80.77% and 55.06% compared to the control in 2021 and 2022, respectively. (4) Tuber yield and marketable tuber rate were both the highest under the $T_{40}M_J$ treatment in both years. Compared with the control, tuber yield increased by 106.24% in 2021 and 67.42% in 2022, while the marketable tuber rate was 13.91% and 6.43% higher, respectively. (5) Soil water storage, root activity, and shoot dry matter accumulation during the bud appearance stage in both years all had significant effects on potato tuber yield formation. However, the extent of these effects varied between years: soil water storage played a more prominent role in 2021, whereas shoot dry matter accumulation had a greater impact in 2022.【Conclusion】Under drought conditions, the cultivation model combining subsoiling at 30—40 cm with straw-based paper film mulching can significantly increase soil water storage during the key growth stages of potatoes in the dryland area of southern Ningxia, promote root growth and development, accelerate the accumulation of shoot and root dry matter, and thereby significantly improve tuber yield and marketable tuber rate.

Key words: rainfed potato; drought year; subsoiling with plastic film mulching; root traits; tuber yield; southern Ningxia arid region

宁夏南部旱作区(简称"宁南旱区")地处黄土高原西北边缘,是我国典型的半干旱雨养农业区,也是马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)种植的重要地带。该地区气候干旱,年降水量仅350 mm左右,而年均蒸发量1 050 mm[1];近60年来干旱年份占比超过17%[2],水资源短缺成为马铃薯生产的首要限制因子。长期以来,以翻耕15 cm为主的传统耕作模式加剧了土壤侵蚀和耕层结构恶化,导致土壤水分通过无效蒸发而大量损失[3],形成的浅薄耕层难以满足马铃薯根系深扎与块茎膨大的需求[4],严重制约着马铃薯的稳产增产。因此,在有限的水资源条件下,探索能够替代传统耕作、兼具蓄水保墒与环保效应的合理耕作结合覆盖的种植模式,对于缓解干旱胁迫、实现马铃薯稳产增产具有重要意义。

合理的耕作深度与覆盖材料相结合是提升旱地生产力的关键途径。深松耕作能有效破除犁底层，加深耕层至30 cm乃至更深，有利于改善土壤团粒结构和增加孔隙度，从而增强土壤的入渗能力、蓄水容量和透气性，进而为马铃薯提供良好的生长环境[5-6]。覆盖措施主要通过抑制水分蒸发、调节地表微环境，促进根系在浅层土壤中的分布与水分养分的高效利用，其中秋季覆盖在保蓄夏秋降水方面效果尤为显著[7-8]。张万锋等[9]研究表明，深翻结合秸秆深埋可为夏玉米根系构建优良微环境而实现节水增产。目前，关于耕作深度、覆盖材料对土壤水分、作物根系及产量的影响研究多聚焦于常规耕作深度或单一覆盖材料，有关不同深松梯度与环保型覆盖材料组合对马铃薯种植区土壤水分、根系特征及产量形成的影响研究较为匮乏；尤其在该区域连续干旱年型下，筛选最优耕作深度与覆盖材料，对缓解干旱胁迫、实现马铃薯稳产增产至关重要。

为此，本研究于2021－2022年连续2个生长季在宁南旱区开展大田定位试验。在秋作物收获后，设置耕作深度和覆盖材料双因素裂区试验，分析耕作深度、覆盖措施及二者交互作用对土壤水分、马铃薯根系特征及其产量的影响，旨在筛选适宜旱作马铃薯生产的最优深松结合地膜覆盖模式，为宁南旱区马铃薯高产绿色栽培提供理论依据与技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于2020年10月－2022年10月在宁夏海原县树台乡大嘴村马铃薯种植基地（36°06′ N，105°31′ E）进行。该试验地位于宁夏南部半干旱区，海拔2 166 m，降雨多集中在7－9月，昼夜温差大，年均气温6.8 ℃，无霜期146 d左右。试验区2021和2022年降水总量分别为317.7 mm和313.3 mm，马铃薯生育期降水量分别为260.1和283.4 mm，试验期间的降水量及气温分布状况见图1。本研究采用国内较常用的降水年型划分标准[10]来划分试验年份降水年型，根据宁夏中卫市海原县18年（2005－2022年）平均降水量（380.2 mm）和均方差（108.7 mm）数据，可知该区域丰水年降水量＞416.1 mm，干旱年降水量＜344.3 mm，因此2021和2022年均为干旱年。

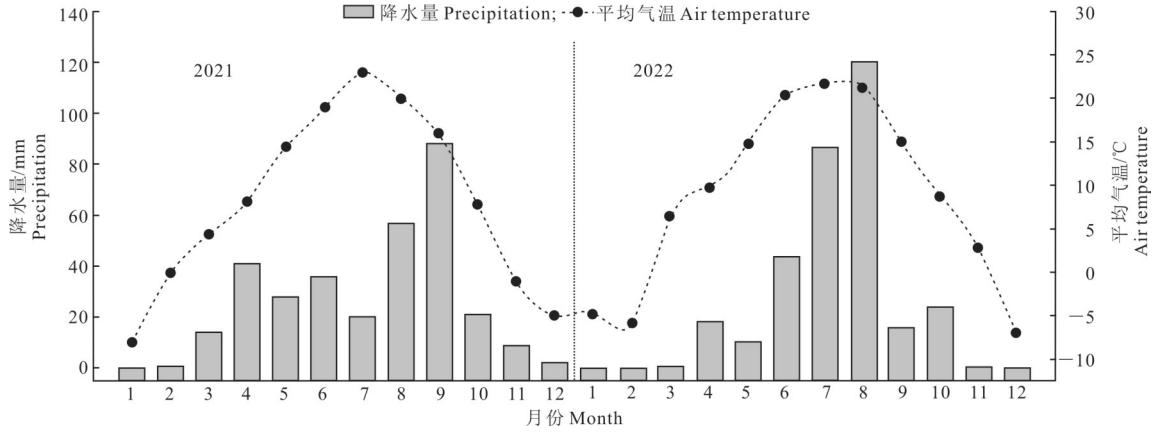


图1　2021－2022年马铃薯生育期试验区降水量和气温的分布

Fig. 1　Distribution of rainfall and air temperature in the experimental area during potato growing season in 2021-2022

试验地处理前0～60 cm层土壤主要理化性质如表1所示，土壤类型为侵蚀黑垆土，耕层土壤肥力属中等水平，氮、磷缺乏，钾丰富，盐碱程度轻。

表1　试验地耕作处理前0～60 cm土层土壤理化性质

Table 1　Physical and chemical properties of the 0－60 cm soil layer before treatment

土层/cm Soil depth	体积质量/(g·cm^{-3}) Bulk density	有机质/(g·kg^{-1}) Soil organic matter	全氮/(g·kg^{-1}) Total nitrogen	碱解氮/(mg·kg^{-1}) Available N	速效磷/(mg·kg^{-1}) Available phosphorus	速效钾/(mg·kg^{-1}) Available potassium
0～20	1.29	18.52	1.21	60.00	19.66	190.66
20～40	1.37	17.61	1.16	53.50	11.97	142.55
40～60	1.40	15.91	0.97	49.84	9.49	112.73

1.2　试验设计

试验采用双因素裂区设计，主因素为耕作深度（T），设翻耕15 cm（T_{15}）、深松30 cm（T_{30}）、深松40 cm（T_{40}）和深松50 cm（T_{50}）4个水平；副因素为覆盖

材料(M),设普通地膜(M_D)、可降解渗水地膜(M_F)、秸秆纸膜(M_J)覆盖和不覆盖(M_B)4个水平,共组成16个(4×4)处理组合(T_xM_x),每处理3次重复,小区面积32 m^2(8 m×4 m)。

各耕作处理的具体措施为:翻耕处理于秋作物收获后,采用铧犁拖拉机翻耕土壤,耕深15 cm,耕后耙耱各1次;深松处理于秋作物收获后,采用维宏-新型(IS-230)深耕机,进行隔年深松(2年深松1次),耕作深度分别为30,40和50 cm。然后结合不同覆盖材料进行休闲蓄水保墒,于4月下旬播种马铃薯。覆盖处理在秋作物收获后,采用平作覆膜方式进行秋耕覆盖。覆盖材料分别为秸秆纸膜(以农作物秸秆纤维为原料合成,膜宽0.8 m,厚0.22~0.31 mm,黑龙江省秸乐农业科技发展有限公司生产)、普通地膜(聚乙烯塑料薄膜,膜宽1.0 m,厚0.01 mm,甘肃福雨塑业有限责任公司生产)、可降解渗水地膜(聚碳酸亚丙酯PPC,膜宽0.8 m,厚0.007 mm,山西微通渗水膜生物科技有限公司生产)和不覆盖。

供试马铃薯品种为'青薯9号'原种,采用平作栽培方式,膜上穴播,宽窄行种植,宽行距60 cm,窄行距40 cm,株距40 cm,穴深15 cm,种植深度10~15 cm,结合秋耕进行秋施肥。苗期培土2次,基施尿素268 kg/hm^2,磷酸二铵200 kg/hm^2,硫酸钾90 kg/hm^2,在马铃薯现蕾期人工追施尿素147 kg/hm^2,基追比7∶3。试验期间无灌溉,采用人工除草。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤蓄水量 在马铃薯关键生育期(现蕾期、块茎形成期、块茎膨大期),利用土钻法按20 cm间隔分层采集0~100 cm土层土样,采用烘干法测定各层土壤质量含水量,进而计算0~100 cm土层土壤蓄水量,其计算公式为:

$$W = 10 \times h \times a \times b。 \quad (1)$$

式中:W为土壤蓄水量,mm;h为土层深度,cm;a为土壤体积质量,g/cm^3;b为土壤质量含水量,%;10为换算系数。

1.3.2 根系形态与生理指标 根据3D monolith根系空间取样方法[8],在马铃薯关键生育期(现蕾期、块茎形成期、块茎膨大期),各处理随机选取长势均匀且位置连续的3株马铃薯,以茎为中心,挖取半径10 cm、高40 cm的近似圆柱形土柱,从挖出土壤中挑出所有根系并用清水洗去黏附在根上的土壤,带回实验室用于相关指标的测定。其中,根系形态指标根表面积、根体积用Win Rhizo根系图像分析软件扫描测定;根系生理指标根系活力采用TTC法测定,根活跃吸收面积采用甲烯蓝法测定。其计算公式分别为:

$$G_a = C \div (1000 \times w \times t)。 \quad (2)$$

式中:G_a为根系活力,mg/(g·h);C为四氮唑还原量,μg;w为根质量,g;t为时间,h。

$$G_b = [V \times (C_0 - C) \times 1.1] \div m。 \quad (3)$$

式中:G_b为根活跃吸收面积,m^2/g;V为测定时所用甲烯蓝溶液的体积,L;C_0为甲烯蓝原溶液质量浓度,mg/L;C为根系吸附后甲烯蓝溶液质量浓度,mg/L;m为根系干质量,g;1.1为换算常数,代表每毫克甲烯蓝分子覆盖的根系表面积,m^2/mg。

1.3.3 干物质积累量 在马铃薯关键生育期,各处理随机选择并挖取长势一致的3株马铃薯带回实验室,将叶、茎、根、块茎各部分剪开,分别称取鲜质量,然后于烘箱中105 ℃杀青30 min,再于80 ℃烘至质量恒定,称取干质量。

1.3.4 马铃薯产量与商品薯率 于收获期将各处理小区马铃薯块茎全部采收,先按单薯质量分为大薯(≥150 g)、中薯(75~150 g)和小薯(≤75 g)三级,再分别称取大、中、小薯各级产量m_b、m_m、m_s,并据此计算马铃薯商品薯率(R_{mp},%)。

$$R_{mp} = (m_b + m_m)/(m_b + m_m + m_s) \times 100\%。 \quad (4)$$

1.4 数据统计分析

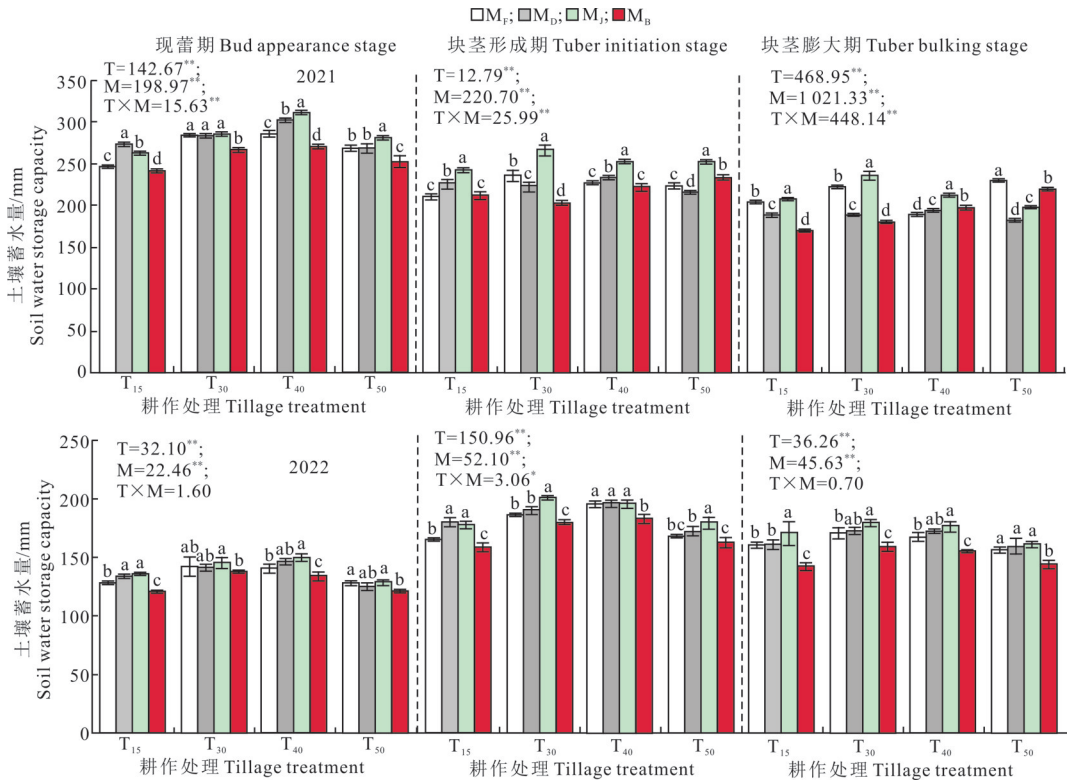
试验数据采用Excel 2021进行整理和分析,用SPSS 26.0进行数据统计分析,LSD($P<0.05$)法进行多重比较;使用Origin 2024进行相关性分析及制图。

2 结果与分析

2.1 深松结合地膜覆盖对马铃薯生育期土壤蓄水量的影响

图2显示,耕作深度、覆盖材料对两年马铃薯关键生育期(现蕾期、块茎形成期、块茎膨大期)0~100 cm土壤蓄水量均有极显著影响,二者交互作用对2021年关键生育期和2022年块茎形成期土壤蓄水量也分别有极显著和显著影响,而对2022年现蕾期和块茎膨大期土壤蓄水量无显著影响。两年马铃薯关键生育期土壤蓄水量在相同耕作深度下基本以秸秆覆盖处理(M_J)最高,在相同覆盖材料下大多以深松30 cm(T_{30})或40 cm(T_{40})处理最高,说明深松30、40 cm结合秸秆覆盖处理下土壤保水效果

最佳。但马铃薯不同生育阶段土壤蓄水量的最优耕作覆膜处理不尽相同。2021 和 2022 年土壤蓄水量在现蕾期均以 $T_{40}M_J$ 处理最高，较相应 $T_{15}M_B$ 处理分别显著提高 28.50% 和 24.02%，在块茎形成期均以 $T_{30}M_J$ 处理最高，较相应 $T_{15}M_B$ 处理分别显著提高 31.69% 和 26.50%，在块茎膨大期也均以 $T_{30}M_J$ 处理最高，较相应 $T_{15}M_B$ 处理分别显著提高 39.21% 和 25.96%。



图中同一耕作处理下不同小写字母表示地膜覆盖处理间差异显著（$P<0.05$）。T、M、T×M 的值表示 F 检验的统计量；T 表示耕作深松；M 表示地膜覆盖；T×M 表示深松结合地膜覆盖的交互效应。* 表示差异显著（$P<0.05$）；** 表示差异极显著（$P<0.01$）。T_{15} 为翻耕 15 cm，T_{30}、T_{40}、T_{50} 分别表示深松 30，40，50 cm；M_F、M_D、M_J、M_B 分别表示可降解渗水地膜、普通地膜、秸秆纸膜覆盖和不覆盖。下同。

Different lowercase letters above the bars indicate significant differences ($P<0.05$) among mulching treatments at the same tillage treatment. Values of T, M, and T×M represent the F-test statistics. T, tillage subsoiling; M, film mulching; T×M, interaction between subsoiling and film mulching. Single (*) and double (**) asterisks denote significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. T_{15}, plowing at 15 cm; T_{30}, T_{40}, and T_{50}, subsoiling at 30, 40, and 50 cm, respectively. M_F, M_D, M_J, and M_B indicate biodegradable water-permeable film mulching, conventional plastic film mulching, straw-based paper film mulching, and no mulching, respectively. The same below.

图 2　深松结合地膜覆盖对马铃薯关键生育期土壤蓄水量的影响

Fig. 2　Effects of combined subsoiling and film mulching on soil water storage at key growing stages of potato

2.2　深松结合地膜覆盖对马铃薯根系形态和生理特征的影响

2.2.1　根表面积　从表 2 可知，马铃薯根表面积和根体积均随生育期的推进逐渐增大，于块茎膨大期达到最大值。根表面积在 2021 年块茎形成期和膨大期受耕作深度的显著影响，在现蕾期受覆盖材料的显著影响，在现蕾期和膨大期均受二者交互作用的显著影响；根表面积在 2022 年各关键时期均受到耕作深度、覆盖材料及其交互作用的极显著影响。现蕾期根表面积在 2021 和 2022 年分别以 $T_{40}M_D$ 和 $T_{30}M_J$ 处理最高，分别较同期 $T_{15}M_B$ 处理显著增加 23.25% 和 38.83%；块茎形成期与块茎膨大期根表面积在 2021 和 2022 年均以 $T_{40}M_J$ 处理最高，块茎形成期分别较同期 $T_{15}M_B$ 处理显著提高 12.81% 和 30.92%，块茎膨大期分别较同期 $T_{15}M_B$ 处理显著提高 14.37% 和 27.56%。

2.2.2　根体积　表 2 显示，马铃薯根体积在 2021 年块茎形成期和膨大期受耕作深度的极显著影响，在各关键生育期均受覆盖材料的极显著影响，在现蕾期、块茎形成期分别受到二者交互作用显著和极显著影响，而在 2022 年各关键生育期均受到耕作深度、覆盖材料及二者交互作用的极显著影响。2021 和 2022 年关键生育期根体积均以 $T_{40}M_J$ 处理表现最高，生育期平均分别较同年 $T_{15}M_B$ 处理显著提高 43.19% 和 56.18%。

表2 深松结合地膜覆盖对马铃薯根表面积和根体积的影响

Table 2 Effects of subsoiling and plastic film mulching on potato root surface area and root volume

年份 Year	处理 Treatment	现蕾期 Bud appearance stage		块茎形成期 Tuber initiation stage		块茎膨大期 Tuber bulking stage	
		根表面积/cm² Root surface area	根体积/cm³ Root volume	根表面积/cm² Root surface area	根体积/cm³ Root volume	根表面积/cm² Root surface area	根体积/cm³ Root volume
2021	$T_{15}M_F$	196.11 a	5.50 a	249.55 ab	10.42 a	392.50 a	11.40 ab
	$T_{15}M_D$	192.84 a	4.27 b	242.69 b	9.79 a	348.85 b	12.15 a
	$T_{15}M_J$	165.11 a	5.74 a	220.64 b	9.79 a	339.58 b	11.84 a
	$T_{15}M_B$	194.34 a	5.87 a	268.68 a	9.91 a	376.89 a	10.68 b
	$T_{30}M_F$	235.55 a	5.04 b	286.18 a	11.16 b	354.43 b	12.99 b
	$T_{30}M_D$	221.32 a	7.79 a	264.71 ab	12.19 ab	401.84 ab	13.31 b
	$T_{30}M_J$	220.10 a	7.88 a	297.29 a	13.81 a	420.65 a	15.48 a
	$T_{30}M_B$	164.85 b	4.99 b	255.89 b	9.66 c	376.06 b	11.67 c
	$T_{40}M_F$	199.66 b	5.79 b	262.95 b	12.38 a	353.06 b	13.29 b
	$T_{40}M_D$	236.53 a	6.29 b	293.25 a	12.44 a	414.81 a	13.22 b
	$T_{40}M_J$	198.49 b	8.09 a	303.09 a	13.95 a	431.05 a	15.66 a
	$T_{40}M_B$	194.09 b	5.74 b	266.56 b	9.34 b	356.64 b	12.84 b
	$T_{50}M_F$	202.09 a	5.74 b	267.24 a	10.44 a	386.08 a	12.06 ab
	$T_{50}M_D$	191.05 a	4.29 c	268.88 a	10.04 a	352.04 ab	12.73 a
	$T_{50}M_J$	184.81 a	7.10 a	248.52 a	10.76 a	318.83 b	13.29 a
	$T_{50}M_B$	191.66 a	3.68 c	256.46 a	9.26 a	374.22 a	11.19 b
	T	3.58	2.07	5.30*	70.80**	7.21*	21.09**
	M	3.27*	7.48**	0.14	20.41**	0.24	16.85**
	T×M	2.01*	2.28*	2.01	4.31**	4.26*	1.51
2022	$T_{15}M_F$	290.50 a	6.71 b	347.74 a	12.39 a	467.38 a	14.95 c
	$T_{15}M_D$	281.44 a	4.84 d	335.47 b	10.12 d	439.75 b	16.04 a
	$T_{15}M_J$	248.32 c	7.77 a	341.54 a	11.79 b	435.66 c	15.44 b
	$T_{15}M_B$	261.78 b	5.78 c	325.81 c	10.73 c	432.54 c	12.83 d
	$T_{30}M_F$	341.46 b	6.63 c	395.36 b	12.78 c	487.25 c	16.87 b
	$T_{30}M_D$	312.25 c	8.87 b	374.29 c	13.44 b	498.79 b	17.13 b
	$T_{30}M_J$	363.43 a	9.50 a	413.67 a	15.75 a	545.49 a	18.29 a
	$T_{30}M_B$	301.94 d	5.85 d	358.49 d	11.20 d	469.34 d	14.58 c
	$T_{40}M_F$	319.23 b	7.75 b	381.22 c	14.21 c	498.95 b	16.95 b
	$T_{40}M_D$	345.59 a	8.22 b	395.76 b	14.93 b	503.26 b	16.91 b
	$T_{40}M_J$	323.39 b	9.82 a	426.56 a	16.31 a	551.74 a	18.83 a
	$T_{40}M_B$	315.25 b	6.94 c	376.85 c	12.13 d	487.53 c	15.86 c
	$T_{50}M_F$	316.03 a	7.24 b	379.35 ab	14.28 ab	487.25 a	14.97 b
	$T_{50}M_D$	300.38 b	6.73 b	388.73 a	13.86 b	456.57 c	15.05 b
	$T_{50}M_J$	302.10 ab	8.08 a	365.48 c	14.50 a	464.69 b	16.65 a
	$T_{50}M_B$	298.66 b	5.25 c	370.66 bc	12.31 c	442.58 d	13.46 c
	T	72.48**	236.56**	252.14**	499.64**	731.25**	77.24**
	M	15.19**	146.66**	49.99**	152.79**	259.85**	215.74**
	T×M	14.75**	18.44**	20.96**	21.29**	88.62**	8.94**

注:同列数据后标有不同小写字母表示相同年份同一耕作方式下不同覆膜处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after data in the same column indicate significant differences among mulching treatments under the same tillage practice in the same year ($P<0.05$).

2.2.3 *根系活力* 由图3可知,马铃薯关键生育期根系活力随生育期的推进逐渐降低,峰值均出现在现蕾期。其中,耕作深度对2021年块茎形成期和块茎膨大期根系活力有极显著影响,对2022年块茎形成期和膨大期根系活力有显著影响;覆盖材料对两年关键生育期根系活力均有极显著影响;二者交互作用对两年块茎形成期和膨大期根系活力有显著影响。深松30,40 cm结合覆盖秸秆纸膜处理对提高马铃薯根系活力效果最佳。2021年马铃薯根系活力在现蕾期以$T_{40}M_J$处理最优,在块茎形成期和块茎膨大期均以$T_{30}M_J$处理最优,三者依次较$T_{15}M_B$处理显著增加57.39%,131.25%和89.32%;2022年马铃薯根系活力在现蕾期以$T_{30}M_J$处理效果最优,在块茎形成期和块茎膨大期均以$T_{40}M_J$处理最

优，三者依次较 $T_{15}M_B$ 处理显著增加 48.77%，107.14% 和 77.38%。

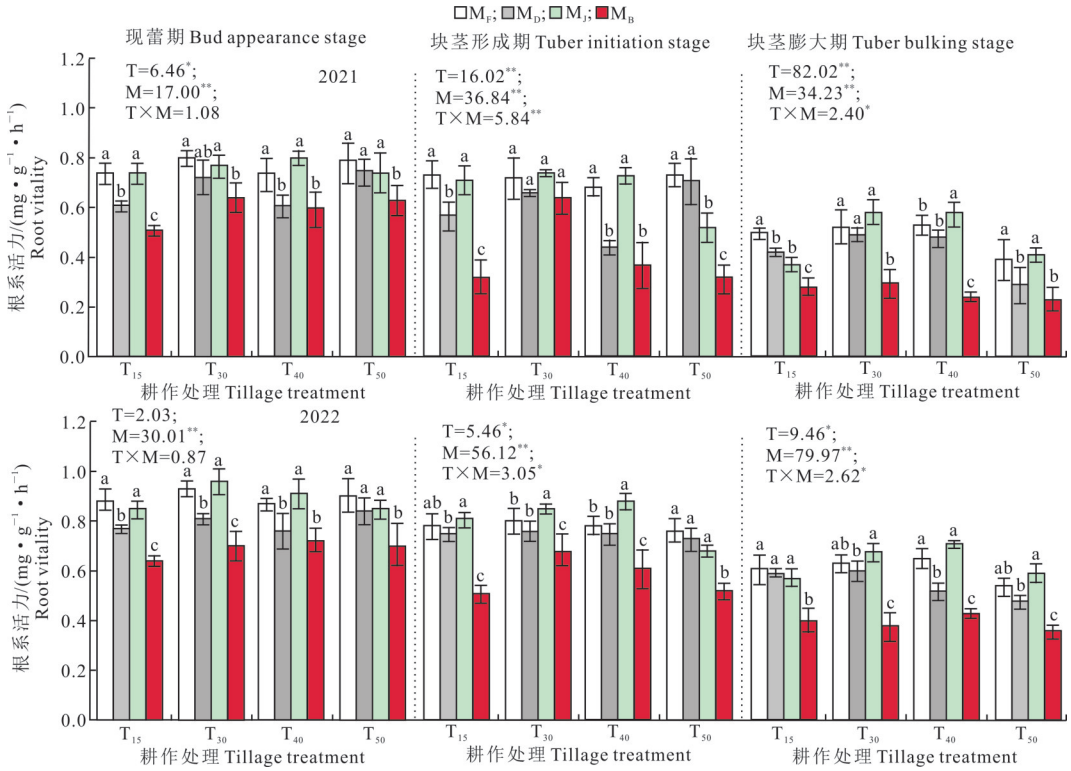


图 3　深松结合地膜覆盖对马铃薯根系活力的影响

Fig. 3　Effects of the interaction between subsoiling and film mulching on potato root activity

2.2.4　*根系活跃吸收面积*　图 4 显示，马铃薯关键生育期根系活跃吸收面积随着生育期的推进而逐渐降低。2021 年，现蕾期和块茎形成期根系活跃吸收面积受到耕作深度极显著影响，在块茎膨大期受到显著影响；各关键生育期根系活跃吸收面积均受到覆盖材料的极显著影响；现蕾期和块茎膨大期根系活跃吸收面积受到二者交互作用显著影响，在块茎形成期受到极显著影响。2022 年各关键生育期根系活跃吸收面均受到耕作深度、覆盖材料及其交互作用的极显著影响；深松 30，40 cm 结合覆盖秸秆纸膜处理对提高马铃薯根系活跃吸收面积效果最佳。其中，2021 和 2022 年现蕾期根系活跃吸收面积均以 $T_{30}M_F$ 处理最优，分别较 $T_{15}M_B$ 处理显著增加 61.14% 和 42.74%；在块茎形成期和块茎膨大期均以 $T_{40}M_J$ 处理最优，块茎形成期分别较 $T_{15}M_B$ 处理显著增加 117.16% 和 76.89%，块茎膨大期分别较 $T_{15}M_B$ 处理显著增加 74.79% 和 41.71%。

2.3　深松结合地膜覆盖对马铃薯干物质累积量的影响

2.3.1　*地上部干物质累积量*　由图 5 可知，马铃薯关键生育期地上部干物质累积量随着生育期的推进而增大。地上部干物质累积量在 2021 年块茎形成期和 2022 年关键生育期均受到耕作深度极显著影响，在两年关键生育期均受到覆盖材料极显著影响，在 2021 和 2022 年关键生育期分别受到二者交互作用的极显著和显著影响。深松 30，40 cm 结合覆盖秸秆纸膜处理对提高马铃薯地上部干物质累积量效果最佳。其中，地上部干物质累积量在 2021 年各关键生育期均以 $T_{30}M_J$ 处理最高，现蕾期、块茎形成期和块茎膨大期分别较 $T_{15}M_B$ 处理显著提高 42.04%，68.17% 和 48.01%，在 2022 年现蕾期以 $T_{40}M_J$ 处理最高，块茎形成期和块茎膨大期均以 $T_{30}M_J$ 最高，三者依次较 $T_{15}M_B$ 处理显著提高 47.11%，58.92% 和 37.90%。

2.3.2　*地下部干物质累积量*　由图 6 可知，马铃薯地下部干物质累积量随生育期的推进逐渐增加，2021 年块茎膨大期受到耕作深度极显著影响，而在各关键生育期均受到覆盖材料、二者交互作用的极显著影响；深松 30，40 cm 结合覆盖秸秆纸膜对马铃薯关键生育期地下部干物质累积量效果较好。其中，地下部干物质累积量在 2021 年现蕾期以 $T_{30}M_F$ 处理最高，在块茎形成期和块茎膨大期均以 $T_{30}M_J$ 最高，三者依次较 $T_{15}M_B$ 处理显著增加 102.46%，56.66% 和 80.77%；在 2022 年现蕾期以 $T_{40}M_J$ 处理最高，块茎形

成期和块茎膨大期均以 $T_{30}M_J$ 最高,三者依次较 $T_{15}M_B$ 处理显著提高 51.89%,66.94% 和 55.06%。

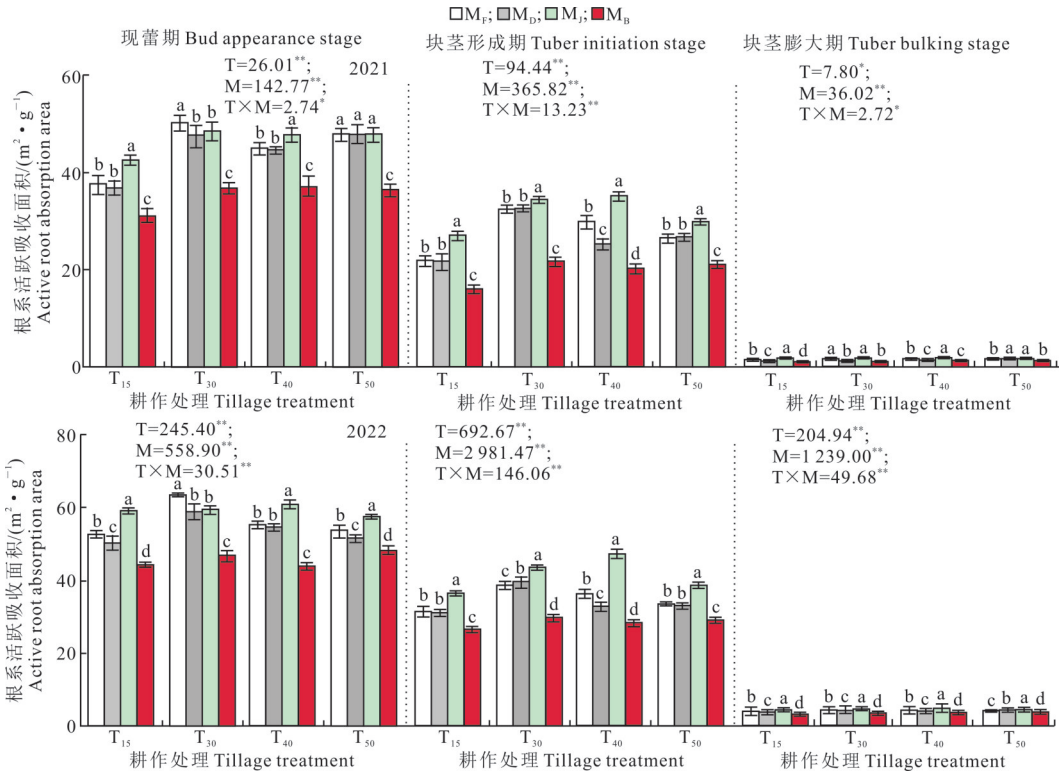


图 4 深松结合地膜覆盖对马铃薯根活跃吸收面积的影响

Fig. 4 Effects of combined subsoiling and film mulching on active root absorption area in potatoes

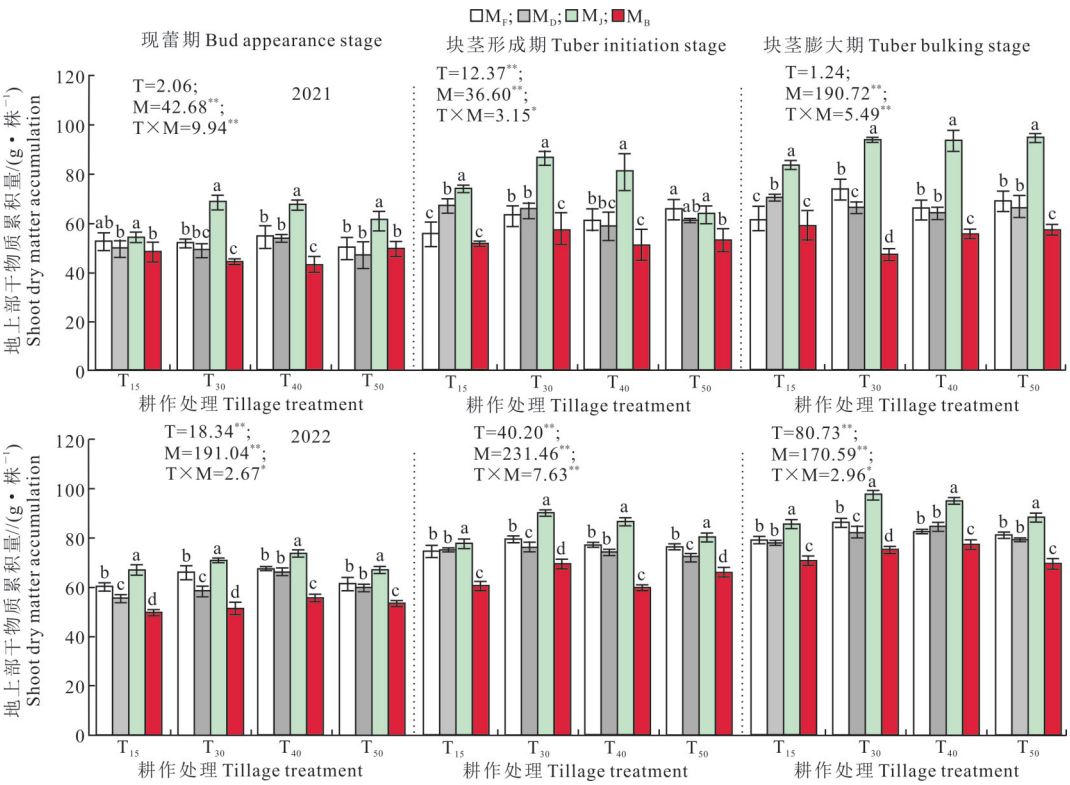


图 5 深松结合地膜覆盖对马铃薯地上部干物质累积量的影响

Fig. 5 Effects of the combined subsoiling and film mulching on potato shoot dry matter accumulation

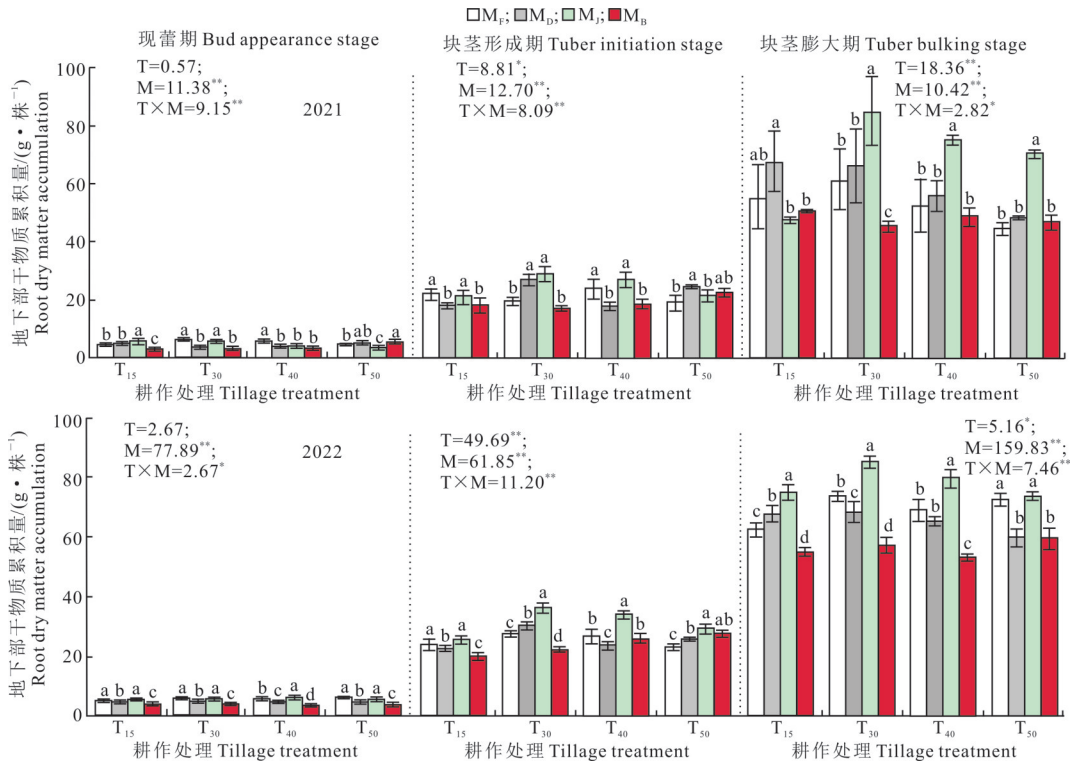


图 6　深松结合地膜覆盖对马铃薯地下部干物质累积量的影响

Fig. 6　Effects of subsoiling combined with film mulching on potato root dry matter accumulation

2.4　深松结合地膜覆盖对马铃薯块茎产量和商品薯率的影响

由图 7 可知，2021 年马铃薯块茎产量受到耕作深度、覆盖材料的极显著影响，商品薯率受到覆盖材料的极显著影响，2022 年马铃薯块茎产量和商品薯率均高于 2021 年，均受到耕作深度、覆盖材料以及二者交互作用的极显著影响；两年马铃薯块茎产量和商品薯率均以深松 40 cm 结合覆盖秸秆纸膜处理最高。块茎产量和商品薯率在两年所有处理组合中均以 $T_{40}M_J$、$T_{30}M_J$ 处理表现较佳，块茎产量在 2021 年分别比 $T_{15}M_B$ 处理显著增加 106.24% 和 93.02%，2022 年则分别显著增加 67.42% 和 61.87%；商品薯率在 2021 年分别比 $T_{15}M_B$ 增加 13.91% 和 12.17%，在 2022 年则分别显著增加 6.43% 和 5.12%。

2.5　深松结合覆盖处理下马铃薯块茎产量与关键生育期土壤水分、根系特征及生物量的关系

由表 3 可知，在现蕾期，马铃薯块茎产量与关键生育期土壤蓄水量、根系活力及根系活跃吸收面积 2 年均呈极显著正相关，与根表面积 2 年均呈正相关，与根体积、地上部干物质累积量在 2021 和 2022 年分别呈显著和极显著正相关，与地下部干物质累积量在 2021 和 2022 年分别呈负相关和极显著正相关。在块茎形成期，马铃薯块茎产量与根体积、根系活力、地上部干物质累积量 2 年均呈极显著正相关，与根表面积 2 年均呈显著正相关，与地下部干物质累积量 2 年均呈正相关，与土壤蓄水量在 2021 和 2022 年分别呈正相关和极显著正相关，与根系活跃吸收面积在 2021 和 2022 年分别呈显著和极显著正相关。在块茎膨大期，马铃薯块茎产量与根体积、根系活力、根系活跃吸收面积 2 年均呈显著正相关，与地上部干物质累积量在 2021 和 2022 年分别呈显著和极显著正相关，与土壤蓄水量、根表面积、地下部干物质累积量在 2021 和 2022 年分别呈正相关和显著正相关。以上相关性分析结果表明，两年马铃薯块茎产量与关键生育期土壤蓄水量、根系特征及生物量均存在一定相关性，其中土壤蓄水量、根系活力对马铃薯块茎薯产量的形成起重要作用，尤其在现蕾期的影响最为显著。可见，现蕾期土壤水分状况的改善，可提高根系活力，促进马铃薯地上部干物质累积，进而提高块茎产量。

3　讨　论

3.1　深松结合地膜覆盖对土壤水分和马铃薯根系特征的影响

在宁南半干旱区，构建以深松蓄墒和秸秆覆盖

保墒为核心的耕作结合覆盖模式,能够通过系统改善土壤水分环境,正向调控马铃薯从根系到冠层的生长发育全过程,最终实现产量提升,这是由于保护性耕作和覆盖措施可显著改善旱区农田土壤水热状况[10-11]。本研究基于连续两个干旱年份的田间试验结果表明,深松30,40 cm结合秸秆纸膜覆盖在马铃薯关键生育期能提高0~100 cm土层土壤蓄水量,且耕作与覆盖的交互效应在降水量更低的2021年影响极显著,而在2022年不显著。原因在于2021年更为严重的干旱使土壤结构更加紧实,透水性差,而深松能有效打破犁底层,降低土壤体积质量,增强水分渗透力[5];秸秆纸膜覆盖能有效减少雨滴对土壤表面的冲击,抑制水分蒸发[10];耕作与覆盖的协同作用可促进水分入渗的同时有效抑制土壤水分流失,提高土壤保水能力[12]。因此,在更为干旱的2021年,深松与地膜覆盖的蓄水保墒协同效应更为显著,而2022年因干旱相对较轻,其作用效果相对较差。

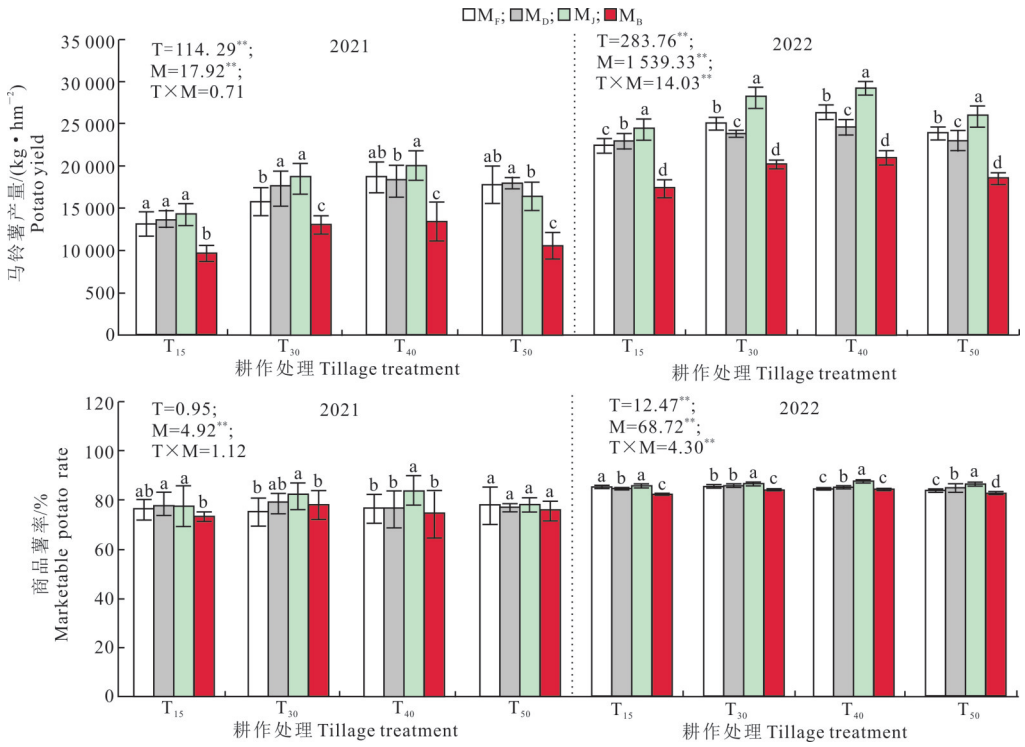


图7 深松结合地膜覆盖对马铃薯产量、商品薯率的影响

Fig. 7 Effects of combined subsoiling and film mulching on potato yield and the proportion of marketable tubers

表3 关键生育期土壤蓄水量、马铃薯根系特征及生物量与块茎产量间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between tuber yield and soil water storage capacity, potato root traits, and biomass during key growth stages

	年份 Year	关键生育期 key growth stage	A	B	C	D	E	F	G
块茎产量 Tuber yield	2021	现蕾期 Bud appearance stage	0.84**	0.44	0.58*	0.70**	0.88**	0.53*	−0.32
		块茎形成期 Tuber initiation stage	0.48	0.52*	0.79**	0.62**	0.84*	0.68**	0.33
		块茎膨大期 Tuber bulking stage	0.29	0.34	0.82**	0.70**	0.68**	0.56*	0.35
块茎产量 Tuber yield	2022	现蕾期 Bud appearance stage	0.71**	0.43	0.75**	0.78**	0.72**	0.82**	0.78**
		块茎形成期 Tuber initiation stage	0.73**	0.51*	0.62**	0.87**	0.78**	0.79**	0.49
		块茎膨大期 Tuber bulking stage	0.85**	0.66**	0.85**	0.86**	0.74**	0.88**	0.74**

注:A. 土壤蓄水量;B. 根表面积;C. 根体积;D. 根系活力;E. 根系活跃吸收面积;F. 地上部干物质累积量;G. 地下部干物质累积量。*表示在0.05水平(双尾)相关性显著,**表示在0.01水平(双尾)相关性显著。

Note: A. Soil water storage; B. Root surface area; C. Root volume; D. Root activity; E. Root active absorption area; F. Shoot dry matter accumulation; G. Root dry matter accumulation. * indicates significant correlation at the 0.05 level (2-tailed), and ** indicates highly significant correlation at the 0.01 level (2-tailed).

深松可改善作物根系形态特征,提升深层根系活力;覆盖能够改善玉米根系生长的土壤微环境,

促进根系形态的建成与生理活化[9]。本研究发现，马铃薯现蕾期根表面积在2021年以深松40 cm结合普通地膜处理最优，2022年以深松30 cm结合秸秆纸膜处理最优；块茎形成期、块茎膨大期的根表面积以及关键生育期的根体积2年均以深松40 cm结合秸秆纸膜最优；根系活力以深松30，40 cm结合秸秆纸膜处理最优；根系活跃吸收面积在现蕾期2年均以深松30 cm结合可降解渗水地膜效果最好，在块茎形成期和块茎膨大期2年均以深松40 cm结合秸秆纸膜处理效果最优。究其原因，深松结合秸秆纸膜覆盖能降低土壤表层水分散失，调节土壤温度，促进根系下扎与发育[13-14]，从而增加根表面积和根体积[15-16]，这与勉有明[14]关于深松30 cm结合覆盖对提升马铃薯根系活力与活跃吸收面积效果最佳的结论相似。可见，深松30～40 cm结合秸秆纸膜覆盖能有效改善土壤物理性质，维系根系生理活性，最终形成庞大的高效根群，为马铃薯产量形成奠定基础[9]。

3.2　深松结合地膜覆盖对马铃薯干物质累积量和产量形成的影响

李丹等[5]研究表明，深松覆盖秸秆处理能提高马铃薯干物质量，在干旱年对马铃薯生育中期地上部干物质量影响更加显著。本研究表明，现蕾期马铃薯地上部干物质累积量2021年以深松30 cm结合秸秆纸膜处理最高，2022年以深松40 cm结合秸秆纸膜处理最高，而在块茎形成期和块茎膨大期2年均以深松30 cm结合秸秆纸膜处理最高；地下部干物质累积量在2021年现蕾期以深松30 cm结合可降解渗水地膜处理最高，在2021年块茎形成和块茎膨大期及2022年关键生育期均以深松30，40 cm覆盖秸秆纸膜处理最高。这与韩固等[3]在平水年的研究结果存在差异，其主要原因在于本试验年份降雨量显著减少，马铃薯植株吸收的水分优先供应地下部分，限制水分向地上部运输，同时地膜覆盖兼具抑制蒸发和增温的双重效应[13,17]；而深松结合秸秆纸膜覆盖处理在马铃薯生育中后期具有显著的降温效果[7,13]。因此，深松结合地膜覆盖措施可显著增加表层土壤含水量，同时改善耕层土壤水分状况，促进作物对深层水分的吸收利用，进而提高作物干物质积累量[3,10,18]。

在欠水年型下深松结合秸秆覆盖能促进植株对养分的吸收，改善土壤肥力，从而提高作物产量[10]。侯贤清等[7]研究表明，在干旱年型下深松、覆盖及二者交互作用均对马铃薯产量和商品薯率有显著影响。本研究结果表明，马铃薯块茎产量和商品薯率均以深松40 cm覆盖秸秆纸膜处理提高效果最佳。究其原因，深松40 cm利于改善深层土壤紧实度，促进土壤水分运移与均衡分布；秸秆覆盖可抑制土壤水分蒸发，具有蓄水保墒作用，同时改善土壤微环境[19-20]，进而促进作物生长发育，最终实现产量提升。深松结合秸秆覆盖处理既能减少前期棵间蒸发、增加土壤蓄水量，又能促进根系吸收深层水分，减轻后期干旱胁迫，有利于促进干物质积累和块茎形成，进而提高马铃薯产量[6,21]。

3.3　深松结合地膜覆盖处理下土壤蓄水量、根系特征及生物量对马铃薯块茎产量的影响

相关研究结果表明，在平水年，当土壤水分不是产量限制因子时，地上部干物质积累对马铃薯产量形成的影响更为突出[3]；而在干旱年型下，现蕾期土壤水分对马铃薯产量影响最大[6]。本研究发现，现蕾期土壤水分和地上部干物质累积量对2年马铃薯产量形成均有显著影响，但其影响程度年际间存在差异，2021年土壤水分对块茎产量的影响显著，而2022年地上部干物质累积量对块茎产量的影响更显著。这与赵富贵等[6]关于高温干旱年型的相关研究结论相似，韩固等[3]在平水年的研究结论也验证了这一结果。陈茜等[22]研究发现，大豆的产量与根系形态指标呈显著正相关；韩固[23]报道，根系生理指标对马铃薯产量形成起重要作用。本研究发现，马铃薯关键生育期根系活力对2年马铃薯产量形成均有极显著影响。分析造成这一差异结果的主要原因，可能有以下几方面：(1)2021年干旱胁迫更严重，现蕾期的水分状况通过影响冠层建成而制约产量潜力的实现[3,6]；(2)干旱年份高温加剧土壤水分蒸发，使现蕾期成为作物需水关键时期[5]；(3)现蕾期的土壤水分对马铃薯产量影响最为显著，良好的土壤水分微环境有利于提高根系活力，可为块茎形成发育提供物质基础，进而提高产量[5,23]。深松结合地膜覆盖可通过优化马铃薯根际土壤水分微环境，使其在干旱期维持较高的根系活力水平，保障水分持续供给，促进干物质积累，从而提高马铃薯产量[5,24-25]。然而，深松结合地膜覆盖对马铃薯块茎产量形成的作用机制，可能还与其耕层土壤结构、肥力因素及叶片生理等有关，今后仍需进一步深入研究。

4 结 论

在宁夏南部旱作区,干旱年型下采用深松30～40 cm结合秸秆纸膜覆盖的栽培模式,可通过提高马铃薯关键生育期0～100 cm土层蓄水能力,优化根系形态建成与生理活性,促进干物质累积,进而显著提高马铃薯块茎产量与商品薯率。其中,深松40 cm结合秸秆纸膜覆盖是马铃薯高产稳产的最佳模式。通过相关性分析可知,现蕾期土壤水分、根系活力和地上部干物质累积量对马铃薯块茎产量形成均有显著影响,且影响程度存在年际差异,在更为干旱的2021年土壤水分对产量的影响更突出,而在2022年则以地上部干物质累积量对产量的影响更显著。

[参考文献]

[1] 李荣,王艳丽,吴鹏年,等. 宁南旱区沟垄覆盖改善土壤水热状况提高马铃薯产量[J]. 农业工程学报,2017,33(10):168-175.
LI R,WANG Y L,WU P N,et al. Ridge and furrow mulching improving soil water-temperature condition and increasing potato yield in dry-farming areas of south Ningxia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(10):168-175.

[2] 方兴义,马思雨. 1960－2022年宁夏南部山区气候变化特征与旱涝区域响应[J]. 气象水文海洋仪器,2025,42(3):75-79.
FANG X Y,MA S Y. Climate change characteristics and regional response to droughts and floods in the southern mountainous areas of Ningxia from 1960 to 2022[J]. Meteorological,Hydrological and Marine Instruments,2025,42(3):75-79.

[3] 韩固,苗芳芳,王楠,等. 深松覆盖模式对宁南地区雨养马铃薯水分利用效率的影响[J]. 中国农业气象,2021,42(11):905-917.
HAN G,MIAO F F,WANG N,et al. Effect of subsoiling and mulching mode on water use efficiency of rainfed potato in Southern Ningxia[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2021,42(11):905-917.

[4] 马晓明,李丹,雷佳,等. 不同降水年型下耕作方式结合覆盖对旱地土壤物理性质和马铃薯产量的影响[J]. 应用生态学报,2024,35(2):447-456.
MA X M,LI D,LEI J,et al. Effects of tillage methods combined with mulching on soil physical properties and potato yield in dryland under different precipitation years[J]. Journal of Applied Ecology,2024,35(2):447-456.

[5] 李丹,王翻龙,张龙,等. 不同降水年型下耕作结合秸秆覆盖对马铃薯耗水特征及产量的影响[J]. 水土保持学报,2023,37(2):275-286.
LI D,WANG F L,ZHANG L,et al. Effects of tillage combined with straw mulching on potato water consumption characteristics and yield under different precipitation years[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(2):275-286.

[6] 赵富贵,张龙,李丹,等. 不同气候年型下耕作覆盖对宁南旱区土壤水热及马铃薯产量的影响[J]. 作物学报,2023,49(10):2806-2819.
ZHAO F G,ZHANG L,LI D,et al. Effects of tillage with mulching on soil water and temperature and potato yield on the dry farmland of southern Ningxia under different climate year types[J]. Acta Agronomica Sinica,2023,49(10):2806-2819.

[7] 侯贤清,李荣,马菲,等. 休闲期耕作覆盖对马铃薯苗期生理生态与产量的影响[J]. 农业机械学报,2020,51(7):263-273.
HOU X Q,LI R,MA F,et al. Effects of fallow tillage mulching on physiology, ecology and yield of potato seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(7):263-273.

[8] 宋启龙,岳善超,蔡立群. 地膜覆盖栽培玉米根系形态对施氮量的响应[J]. 水土保持研究,2020,27(2):23-29.
SONG Q L,YUE S C,CAI L Q. Response of maize root morphology to nitrogen application under film mulch[J]. Research of Soil and Water Conservation,2020,27(2):23-29.

[9] 张万锋,杨树青,娄帅,等. 耕作方式与秸秆覆盖对夏玉米根系分布及产量的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(7):117-124.
ZHANG W F,YANG S Q,LOU S,et al. Effects of tillage methods and straw mulching on the root distribution and yield of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(7):117-124.

[10] 苗芳芳,勉有明,普雪可,等. 耕作覆盖对宁南旱区土壤团粒结构及马铃薯水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2021,54(11):2366-2376.
MIAO F F,MIAN Y M,PU X K,et al. Effects of tillage with mulching on soil aggregate structure and water use efficiency of potato in dry-farming area of southern Ningxia[J]. Scientia Agricultura Sinica,2021,54(11):2366-2376.

[11] 侯贤清,李荣. 秋耕覆盖对土壤水热肥与马铃薯生长的影响分析[J]. 农业机械学报,2020,51(12):262-275.
HOU X Q,LI R. Effects of autumn tillage with mulching on soil water, temperature and nutrient and potato growth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(12):262-275.

[12] 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 L,LI J,ZHAO F G,et al. Synergistic effect of no-tillage or subsoiling 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.

[13] 张楷楷,赵德明,马菊花,等. 垄沟秸秆覆盖对旱作马铃薯土壤水热特征及产量的影响[J]. 作物杂志,2025(1):139-146.
ZHANG K K,ZHAO D M,MA J H,et al. Effects of furrow straw mulching on soil hydrothermal characteristics and yield of potato under dry cultivation[J]. Crops,2025(1):139-146.

[14] 勉有明. 耕作覆盖对旱地土壤环境和马铃薯生理生态及产量

的影响[D]. 银川：宁夏大学，2020
MIAN Y M. Effects of tillage cover on soil environment, potato physiology and yield in dryland[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020.

[15] 张瑞富，张玉芹，杨恒山. 深松措施下磷肥施用深度对春玉米根系特性的影响[J]. 华北农学报，2019，34(1)：204-212.
ZHANG R F, ZHANG Y Q, YANG H S. Effect of phosphorus fertilizer application depth on root characteristics of spring maize under subsoiling measures[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(1): 204-212.

[16] 姜英，王峥宇，廉宏利，等. 耕作和秸秆还田方式对东北春玉米吐丝期根系特征及产量的影响[J]. 中国农业科学，2020，53(15)：3071-3082.
JIANG Y, WANG Z Y, LIAN H L, et al. Effects of tillage and straw returning on root characteristics and yield of spring maize at silking stage in Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(15): 3071-3082.

[17] 赵阳青，张姚，马建涛，等. 秸秆带状覆盖对旱作马铃薯光合特性的影响[J/OL]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2026，54(4)：63-73[2025-12-07]. https://doi. org/10. 13207/j. jnwafu. 2026. 04. 008. DOI:10. 13207/j. jnwafu. 2026. 04. 00.
ZHAO Y Q, ZHANG Y, MA J T, et al. Effects of straw strip mulching on photosynthetic characteristics of dryland potatoes [J/OL]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2026, 54(4): 63-73[2025-12-07]. https://doi. org/10. 13207/j. jnwafu. 2026. 04. 008. DOI: 10. 13207/j. jnwafu. 2026. 04. 00.

[18] ZHANG C X, GUO J, MA F Y, et al. Effects of vertical rotary subsoiling with plastic mulching on soil water availability and potato yield on a semiarid Loess Plateau, China[J]. Soil & Tillage Research, 2020, 199104591-104591.

[19] 赵丽，张琪，谢广明，等. 覆盖与行距配置对玉米叶片光合性能和茎秆力学特性及产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2023，51(10)：29-39，51.
ZHAO L, ZHANG Q, XIE G M, et al. Effects of mulching and row spacing on photosynthetic performance, stem mechanical properties and yield of maize[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2023, 51(10): 29-39, 51.

[20] 刘星华，王琦，贾生海. 栽培方式对旱作春玉米土壤酶活性及干物质积累和产量形成的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2015，43(9)：73-81.
LIU X H, WANG Q, JIA S H, et al. Effects of cultivation methods on soil enzyme and dry matter accumulation and yield of spring maize in dryland[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2015, 43(9): 73-81.

[21] 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 R, YAN H F, ZHANG L, et al. Effects of different tillage practices on soil physical properties and crop yield in the region of southern Ningxia. [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(18): 3543-3555.

[22] 陈茜，郑彩霞，闫敏，等. 水氮耦合对间作大豆根系生长、产量及水氮利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究，2025，43(2)：160-172.
CHEN X, ZHENG C X, YAN M, et al. Effects of water-nitrogen coupling on root growth, yield and water and nitrogen use efficiency of intercropped soybean[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025, 43(2): 160-172.

[23] 韩固. 耕作深度结合覆盖对宁南旱区马铃薯根系特征与块茎产量形成的影响[D]. 银川：宁夏大学，2022.
HAN G. Effects of tillage depth combined with mulching on root characteristics and tuber yield formation of potato in arid area of southern Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.

[24] 韩固，苗芳芳，王楠，等. 宁南旱区耕作覆盖对马铃薯产量及土壤水热特征的影响[J]. 应用生态学报，2022，33(12)：3352-3362.
HAN G, MIAO F F, WANG N, et al. Effects of tillage with mulching on potato yield and characteristics of soil water and temperature in arid area of southern Ningxia. [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3352-3362.

[25] 李荣，刘婷婷，马晓明，等. 深松施氮对旱作马铃薯根系生长与氮素利用特征的影响[J]. 农业机械学报，2025，56(11)：696-707.
LI R, LIU T T, MA X M, et al. Effects of subsoiling combined with nitrogen application on root growth and nitrogen utilization characteristics of rainfed potato[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(11): 696-707.

（责任编辑：温晓平）