

免耕覆盖提升土壤水分利用和马铃薯产量的协同效应

韩固^{1,2}, 侯贤清¹, 段瑞兵², 马媛², 刘亚楠², 李荣¹

(1.宁夏大学农学院, 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]针对宁夏南部山区春旱与春寒并重、土壤有效耕层浅等问题,为探究免耕覆盖对提升土壤水分利用和马铃薯产量的协同效应。[方法]于 2014—2016 年连续 3 a 在秋作物收获后设置免耕覆盖秸秆(NJ)、免耕覆盖地膜(ND)、免耕不覆盖(NB)3 种不同免耕覆盖模式,以翻耕不覆盖为对照(CK),分析休闲期免耕覆盖模式对宁南旱区土壤蓄水保墒效果、降水利用和马铃薯产量的影响。[结果]休闲期土壤蓄水量和蓄水效率均在相对枯水年以 ND 处理最高,分别较 CK 提高 7.60% 和 140.35%;平水年和枯水年均以 NJ 处理最高,分别较 CK 显著提高 11.18%、65.43%、28.42% 和 122.72%。NJ 处理在平水年、枯水年苗期-收获期及相对枯水年蕾期-收获期土壤蓄水量最高,分别平均较 CK 提高 10.51%、12.89%、20.04%;ND 处理在相对枯水年苗期土壤蓄水量较 CK 显著提高 11.42%。免耕覆盖秸秆处理对相对枯水年马铃薯现蕾-膨大期 100~140 cm 土层,平水年 40~100 cm 土层、枯水年 0~40、100~160 cm 土层土壤蓄水效果最佳,免耕覆盖地膜处理对平水年和枯水年 180~200 cm 土层土壤蓄水效果最佳。在相对枯水年生育前期(播种-现蕾期)和枯水年生育中期(现蕾-膨大期)ND 处理耗水量分别较 CK 显著提高 22.26% 和 36.57%;NJ 处理在相对枯水年和枯水年生育后期(膨大-收获期)、平水年生育中后期(现蕾-收获期)耗水量分别平均较 CK 显著提高 1.21、7.14 倍和 13.91%。马铃薯产量在相对枯水年以 NJ 处理最高,较 CK 显著提高 51.80%;平水年和枯水年 ND 处理分别较 CK 显著提高 6.35% 和 71.36%。通过相关性分析发现,苗期-现蕾期耗水量对产量的形成起重要作用,块茎形成-收获期耗水量对提高产量和水分利用效率起至关重要作用。年降水利用效率、生育期降水利用效率及水分利用效率均在相对枯水年以 NJ 处理效果较佳,分别较 CK 显著提高 51.79%、51.80% 和 50.52%;ND 处理在平水年和枯水年平均分别较 CK 显著提高 35.14%、36.14% 和 21.61%。[结论]免耕结合覆盖措施能有效改善休闲期和生育期土壤蓄水保墒效果,显著提高马铃薯产量及降水利用效率,以免耕覆盖秸秆模式可实现马铃薯持续增产和水分高效利用。

关键词: 降水年型; 免耕覆盖; 土壤水分; 马铃薯产量; 水分利用效率

中图分类号: S532.0

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0120-10

Synergistic Effects of No-tillage Combined with Mulching on Improving Soil Moisture Use and Potato Yield

HAN Gu^{1,2}, HOU Xianqing¹, DUAN Ruibing², MA Yuan², LIU Yanan², LI Rong¹

(1.School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2.Experimental Center of Desert Forestry Chinese Academy of Forestry, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China)

Abstract: [Objective] Considering the severity of both spring drought and spring cold, and shallow effective topsoil in the southern mountainous areas of Ningxia Province, synergistic effects of no tillage combined with mulching on improving soil moisture use and potato yield were investigated. [Methods] From 2014 to 2016, three different no-tillage mulching modes, including no-tillage straw mulching (NJ), no-tillage mulching film (ND), no-tillage no mulching (NB), and no-tillage no mulching as control (CK), were set up after autumn crops were harvested for three consecutive years. The effects of no-tillage with mulching mode on soil moisture retention, precipitation utilization and potato yield in arid region of southern Ningxia were analyzed.

收稿日期: 2024-08-14

修回日期: 2024-09-18

录用日期: 2024-10-11

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-12-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(32160515); 宁夏自然科学基金项目(2023AAC03150, 2023AAC03149)

第一作者: 韩固(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事旱地保护性耕作技术研究。E-mail: hg1765883646@163.com

通信作者: 李荣(1984—), 女, 副教授, 博士, 硕士研究生导师, 主要从事旱作农业节水技术研究。E-mail: lirong_mail@126.com

[**Results**] Soil water storage and water storage efficiency during the fallow period were the highest under ND treatment, which increased by 7.60% and 140.35% compared with CK, respectively; Those in normal year and dry year were the highest under NJ treatment, which were increased significantly by 11.18% and 65.43%, and 28.42% and 122.72% compared with CK, respectively. NJ treatment had the highest soil water storage from the seedling stage to harvest in normal and dry years, and from the budding stage to harvest in relatively dry years, which was increased by 10.51%, 12.89% and 20.04%, respectively, compared with CK. ND treatment significantly increased soil water storage by 11.42% compared with CK at the seedling stage in relatively dry years. The no-tillage and straw mulching treatment has the best soil water storage effect from the budding stage to swelling stage of potatoes in relatively dry years, specifically in the 100—140 cm layer, the 40—100 cm layer in normal years, the 0—40 cm layer in dry years, and the 100—160 cm layer. The no-tillage and plastic mulching treatment had the best soil water storage effect on the 180—200 cm layer in normal and dry years. The water consumption in ND treatment was 22.26% and 36.57% higher than that in CK in early growth stage (sowing-budding stage) and middle growth stage (budding-expanding stage) of relatively dry years, respectively. The water consumption in NJ treatment significantly increased by 1.21 times, 7.14 times and 13.91%, respectively, compared with CK, in the late growth period (expanding-harvest stage) and middle and late growth period (budding-harvest stage) of relative dry years and dry years, respectively. Potato yield was the highest in NJ treatment, which was significantly increased by 51.80% compared with CK. In normal years and dry years, potato yield of ND treatment significantly increased by 6.35% and 71.36% compared with CK, respectively. Through correlation analysis, it was found that water consumption during the seedling stage played an important role in potato yield, yield composition, and water use efficiency. The annual precipitation use efficiency, precipitation use efficiency and water use efficiency in the growth period were higher under NJ treatment than under CK, which were significantly increased by 51.79%, 51.80% and 50.52%, respectively; those under ND treatment significantly increased by 35.14%, 36.14% and 21.61% compared with CK in normal years and dry years, respectively. [**Conclusion**] No-tillage combined with mulching can effectively improve soil water storage and soil moisture retention during the fallow period and growth period, and significantly improve potato yield and water use efficiency. The no-tillage and straw mulching mode can realize continuous potato yield increase and high water use efficiency.

Keywords: rainfall years; no-tillage mulching; soil water; potato yield; water use efficiency

Received: 2024-08-14

Revised: 2024-09-18

Accepted: 2024-10-11

Online(www.cnki.net): 2024-12-03

宁夏南部(简称宁南)地处西北黄土高原半干旱雨养农业区,属旱塬地,塬区和残塬沟谷区的塬面较平坦,是马铃薯重要的生产基地,素有“马铃薯之乡”的称号^[1]。水资源不足是限制该区作物生长的重要因素^[2]。常年进行土壤翻耕,破坏土壤结构、水分散失严重,造成土壤蓄水保墒能力较差^[3],严重影响当地马铃薯的高效生产。黄土高原土层深厚,土壤结构疏松,透水性能较强,蓄水能力较好^[4]。因此,如何充分利用有限的降水,增加土壤蓄水能力,减少土壤水分的无效蒸发,提高水分利用效率,是黄土高原旱作农业高效可持续发展的关键。

免耕覆盖技术是调节干旱环境下土壤水分利用的有效措施,可减少土壤侵蚀,有效保持土壤水分,并提高作物产量^[5]。研究^[6]表明,免耕较传统翻耕更能

保护耕层土壤结构,提高土壤水分体积分数,覆盖秸秆能有效减少对土壤耕层的扰动,减少水土流失,增加作物产量;休闲耕作有利于旱地小麦储存降雨和水分,提高土壤储水效率,干旱年份的效率更高^[7],覆盖地膜能抑蒸保墒,协调马铃薯耗水与土壤水分间的分配,从而增加马铃薯产量和水分利用效率^[8]。因此,合理的耕作覆盖模式可调节作物耗水过程和产量形成,提高降水利用效率。然而,以往研究主要集中在单一的耕作方式或覆盖措施对土壤水分和作物产量的独立影响。而对免耕结合不同覆盖材料下土壤水分、作物耗水及马铃薯产量的研究尚鲜见报道。本研究以休闲期免耕覆盖蓄水保墒为目标,在秋作物收获后进行免耕结合不同覆盖措施试验,探究免耕覆盖对马铃薯各生育阶段土壤水分、产量及降水利用特征的

影响,以期为宁南旱区马铃薯高产栽培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 2013—2016 年 10 月在宁夏回族自治区彭阳县城阳乡长城塬旱作农业试验站进行。试验区位于宁夏南部山区(106°32′~106°58′E, 35°41′~36°17′N),海拔 1 800 m,年际蒸发量 1 050 mm,年平均降水量 431 mm,降水集中发生在 7—9 月,年平均气温 8.1 °C,无霜期 155 d,昼夜温差较大,属典型温带半干旱大陆性季风气候。试验期间月降水量及阶段降水量见图 1。2013 年 10 月至 2016 年 9 月降水总量分别为 396.3、463.2、369.0 mm,冬闲期(10 月至翌年 4 月)降水量分别为 112.9、131.5、120.6 mm。本文降水年型采用国内常用划分标准^[9],当年降雨量 $P > \text{多年平均降雨量 } M + 0.33\delta$ 、当年降雨量 $P < \text{多年平均降雨量 } M + 0.33\delta$ 分别为丰水年、枯水年, δ 为多年平均降水均方差。可知,2014 年为相对枯水年,2015 年为平水年,2016 年为枯水年。试验田为旱塬地,土壤质地为黄绵土,播前 0~40 cm 土层土壤有机质质量分数为 7.5 g/kg,速效氮、有效磷和速效钾质量分数分别为 58.6、8.4、150.0 mg/kg,肥力属低等水平。

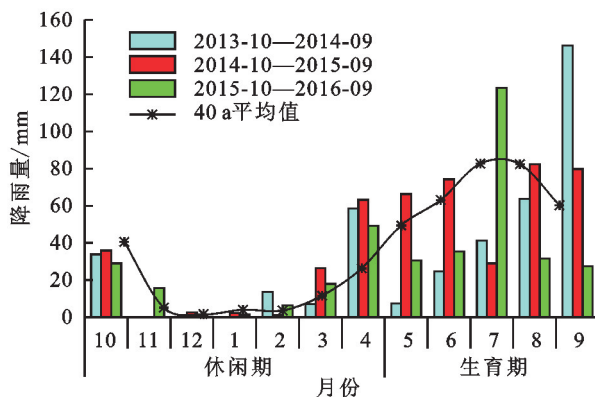


图 1 试验期间降水量

Fig.1 Precipitation during the test period

1.2 试验设计

本试验设置免耕覆盖玉米秸秆(NJ)、免耕覆盖普通白色地膜(ND)、免耕不覆盖(NB)3种免耕覆盖模式,以传统翻耕不覆盖为对照(CK),共 4 个处理;采用随机区组设计,3 次重复,共 12 个小区,小区面积 36 m²(4 m×9 m)。

耕作处理:1)免耕。秋作物收获后,清理表土的残茬与杂草,次年 4 月末穴播马铃薯;2)翻耕。秋作物收获后,采用 1 L-220 型专用铧式犁拖拉机耕翻土壤,耕作深度 15~20 cm,耕后耙耱 1 次,翌年 4 月末穴播马铃薯。

覆盖:1)秸秆覆盖。耕作后地表覆盖玉米秸秆,厚度 5~8 mm,秸秆用量 9 000 kg/hm²;2)地膜覆盖。耕作后地表覆盖地膜(0.8 m 宽、0.008 mm 厚聚乙烯白色地膜),平膜人工覆盖。

试验前茬作物为春玉米,采用传统翻耕方式。马铃薯供试品种为“陇薯 3 号”,采用平作栽培方式,宽窄行种植,宽行 60 cm,窄行 40 cm,株距 40 cm,种植密度 5 万株/hm²,穴播后盖土;秋季基肥施农家肥(牛粪)30 t/hm²,氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)分别为 69、69、75 kg/hm²。试验期间无灌水,进行人工除草。马铃薯分别于 2014 年 4 月 28 日、2015 年 5 月 2 日、2016 年 5 月 4 日播种;于 2014 年 10 月 3 日、2015 年 9 月 23 日、2016 年 10 月 2 日收获。

1.3 项目测定与方法

1.3.1 土壤水分 在马铃薯各生育期采用土钻烘干法测定 0~200 cm 层土壤水分体积分数,20 cm 为 1 层,3 次重复。每处理选择 2 株马铃薯中间区域进行测定。土壤蓄水量^[2]、土壤蓄水效率^[7]计算公式分别为:

$$WS = W_i \times V_i \times h \times 10 \quad (1)$$

$$WSE = \frac{T}{R} \times 100\% \quad (2)$$

式中:WS 为土壤蓄水量,mm; i 为土层,cm; W 为土壤水分质量分数,%; V 为土壤体积质量,g/cm³; h 为土层厚度,cm;WSE 为土壤蓄水效率,%; T 为某阶段一定土层中增加的蓄水量,mm; R 为同时期降水量,mm。

阶段作物耗水量^[10]、水分利用效率^[2]、全年降水利用效率^[11]、生育期降水利用效率^[11]计算公式分别为:

$$ET = \Delta W + I + P - D + W_a - R \quad (3)$$

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (4)$$

$$RPE = \frac{Y}{R_a + R_b} \quad (5)$$

$$PUE = Y/R_b \quad (6)$$

式中:ET 为作物耗水量,mm; ΔW 为生育阶段土壤蓄水量变化量,mm; I 为灌溉量,mm; P 为作物生育期 ≥ 5 mm 降雨量; D 为灌溉后土壤水向下层流动量,mm; W_a 为深层地下水利用量,mm; R 为地表径流,mm; W_1 为阶段初始期土壤蓄水量,mm, W_2 为阶段结束期土壤蓄水量,mm。本试验地无灌溉,地表径流小,且地下水位较深(大于 50 m),因此, I 、 D 、 W_a 和 R 可忽略不计。WUE 为水分利用效率,%; Y 为作物单位面积产量,kg;RPE 为全年降水利用效率,%; R_a 为休闲期降雨量,mm; R_b 为生育期降雨量,mm;PUE 为生育期降水利用效率,%。

1.3.2 马铃薯产量及构成因素 马铃薯收获期测定各小区产量,并各处理取连续 10 株马铃薯测定单株薯数、单薯质量和单株产量。

1.4 统计分析

试验数据采用 Excel 2019 软件进行处理,运用 DPS 2005 软件进行单因素方差分析,采用最小差异显著法(least significant difference method, LSD)进行差异显著性检验($p < 0.05$)。采用 Origin 2018 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 免耕覆盖对土壤蓄水保墒作用

2.1.1 休闲期土壤水分 由表 1 可知,3 a 休闲期各处理土壤蓄水量均随降雨量增加而有不同程度增加,免耕覆盖地膜处理能增加 2014 年休闲期土壤蓄水量,而免耕覆盖秸秆处理有利于 2015 年和 2016 年休闲

期土壤蓄水量的提高。休闲初期,2013 年 10 月由于无耕作覆盖,各处理 0~200 cm 层土壤蓄水量均为 450.40 mm。2014 年休闲末期,ND、NJ 处理较 CK 分别增加 7.60%和 6.43%,NB 处理与 CK 无显著差异。2015 年休闲末期以 NJ 处理土壤蓄水量最高,较 CK 显著增加 11.18%,ND、NB 处理与 CK 无显著差异。2016 年休闲末期以 NJ 处理蓄水量最高,ND 处理次之,较 CK 分别显著提高 28.42%和 24.81%,而 NB 处理与 CK 差异不显著。随降雨量增加,免耕覆盖模式下的土壤蓄水效率存有差异。休闲期土壤蓄水效率在平水年和枯水年均以 NJ 处理最高,较 CK 分别显著提高 65.43%和 122.72%,ND 处理次之,较 CK 分别显著提高 37.68%和 110.07%,NB 处理与 CK 差异不显著。而相对枯水年以 ND 处理最高,NJ 处理次之,分别较 CK 显著提高 140.35%和 115.84%,NB 处理与 CK 差异不显著。

表 1 休闲期免耕覆盖对土壤蓄水保墒效应的影响

Table 1 The effects of no-tillage and mulching during the fallow period on soil water storage and moisture retention

处理	2014 年			2015 年			2016 年		
	休闲期土壤蓄水量/mm		蓄水效率/%	休闲期土壤蓄水量/mm		蓄水效率/%	休闲期土壤蓄水量/mm		蓄水效率/%
	初期	末期		初期	末期		初期	末期	
NB	450.40	476.00±10.61b	22.67±0.90b	471.48±8.59b	516.56±3.72b	34.28±0.59c	341.90±4.82c	400.31±11.68c	48.43±1.39b
NJ	450.40	506.80±5.52a	49.32±1.56a	485.98±8.18a	556.59±6.20a	53.70±2.76a	374.83±5.85a	500.73±7.94a	104.39±0.69a
ND	450.40	512.40±11.76a	54.92±3.84a	465.20±9.96c	523.98±3.25b	44.69±1.40a	367.92±14.63b	486.88±8.44b	98.46±1.43a
CK	450.40	476.20±10.45b	22.85±0.82b	457.96±10.64c	500.64±9.50c	32.46±1.39b	333.40±10.12c	389.93±8.22c	46.87±2.98c

注:表中数据均为平均值±标准差;同列不同字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.1.2 马铃薯生育期土壤水分 各处理 0~200 cm 土层土壤蓄水量随生育时期呈“高-低-高”变化趋势,各处理均在苗期最高,相对枯水年最高,枯水年最低,与休闲期降水量有关(图 2)。免耕覆盖地膜能增加相对枯水年苗期土壤蓄水量,而免耕覆盖秸秆有利于平水年和枯水年全年土壤蓄水量的提高。相对枯水年,苗期土壤蓄水量以 ND 处理最高,较 CK 显著增加 11.42%,其

他处理间差异不显著;现蕾期-收获期土壤蓄水量均以 NJ 处理最高,平均较 CK 显著增加 10.51%,ND、NB 处理与 CK 无显著差异。平水年和枯水年苗期-收获期,土壤蓄水量均以 NJ 处理最高,平均较 CK 分别显著增加 12.89%和 20.04%,ND 处理次之,较 CK 分别显著提高 6.82%和 15.43%。可见,免耕覆盖秸秆更能增加马铃薯生育期土壤蓄水量。

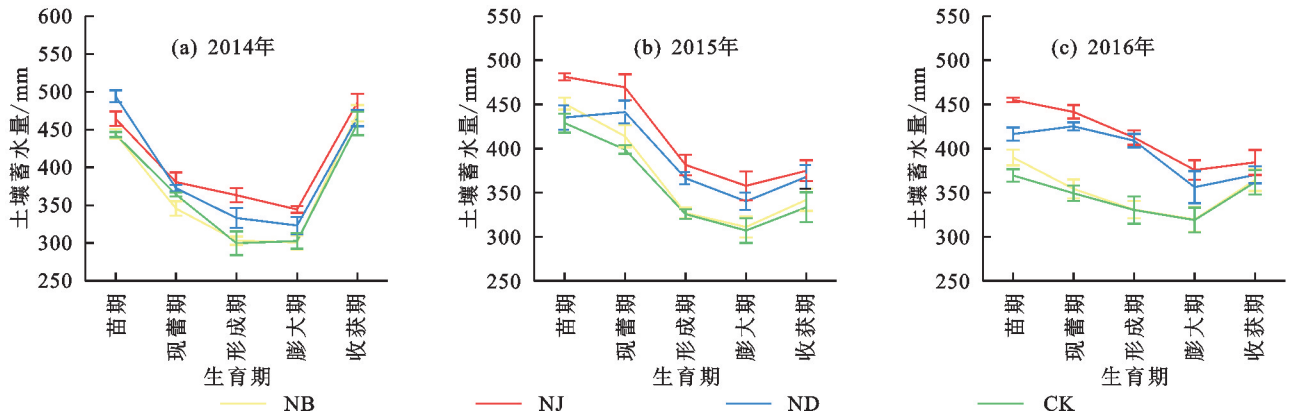


图 2 免耕覆盖处理下马铃薯生育期土壤蓄水量

Fig.2 Soil water storage during potato growth period under no-tillage and mulching treatment

由图 3 可知,不同耕作覆盖措施下各处理 0~200 cm 土层土壤蓄水量垂直变化均有所不同。马铃薯现

蕾期,相对枯水年 NJ 处理 80~140 cm 土层土壤蓄水量最高,各处理间差异不显著;平水年 NJ 处理 40~

180 cm 土层土壤蓄水量较 CK 提高 19.90%，ND 处理 0~20 和 180~200 cm 土层分别较 CK 提高 10.84% 和 6.25%；枯水年 NJ 处理 0~40、140~180 cm 土层土壤蓄水量最高，分别较 CK 显著提高 13.76% 和 25.49%。块茎形成期，相对枯水年 NJ 处理 60~120 cm 土层土壤蓄水量较 CK 显著提高 23.00%；平水年 0~100、140~180 cm 土层 NJ 处理较 CK 显著提高 15.00% 和 23.00%；枯水年，NJ 处理 0~200 cm 土层土壤蓄水量较 CK 显著提高 37.00%。块茎膨大期，相对枯水年 NJ 处理 0~60、100~200 cm 土层土壤蓄水量较 CK 分别

显著提高 8.00% 和 18.00%；平水年 NJ 处理 40~100 cm 土层土壤蓄水量较 CK 显著提高 18.00%，ND 处理 180~200 cm 土层土壤蓄水量较 CK 显著提高 16.00%；枯水年 NJ 处理 40~160 cm 土层土壤蓄水量较 CK 显著提高 20.00%，ND 处理 180~200 cm 土层土壤蓄水量较 CK 显著提高 28.00%。可见，免耕覆秸秆处理对相对枯水年马铃薯关键生育期 100~140 cm 土层土壤蓄水效果最佳，平水年 40~100 cm 土层、枯水年 0~40、100~160 cm 土层土壤蓄水效果最佳，免耕覆盖地膜处理对平水年和枯水年 180~200 cm 土层土壤蓄水效果最佳。

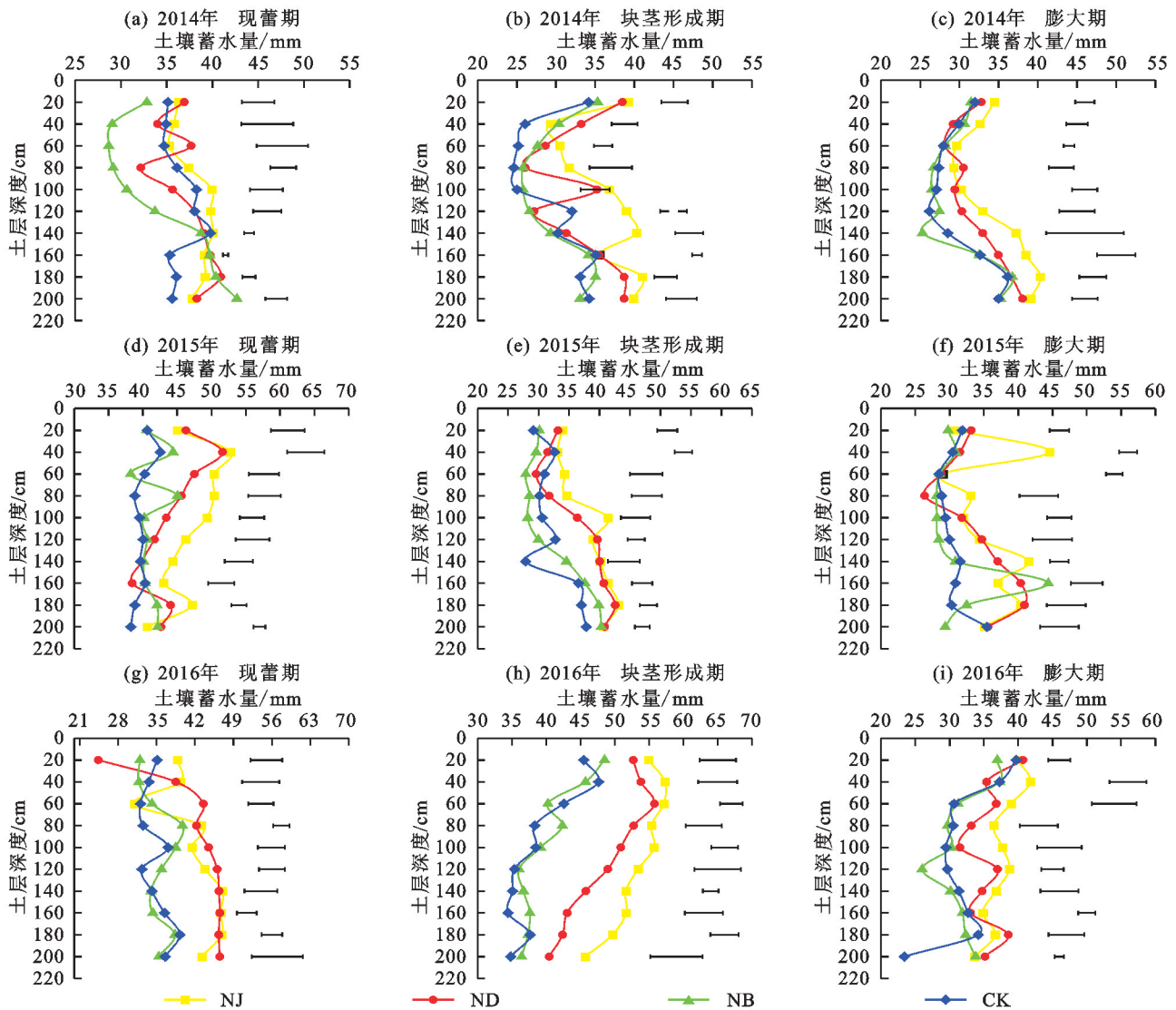


图 3 各处理下 0~200 cm 土层土壤蓄水量

Fig.3 Soil water storage in each soil layer of 0-200 cm under different treatments

2.1.3 各生育阶段马铃薯耗水量 不同处理下各生育阶段马铃薯耗水量呈先增后降趋势(表 2)，均在生育中期(现蕾-膨大期)出现峰值，且平水年最高，相对枯水年次之，枯水年最低。免耕覆秸秆处理可减少马铃薯生育前期土壤水分的消耗，增加生育中后期土壤水分消耗，促进马铃薯向深层土壤吸收水分。

在相对枯水年，马铃薯生育前期(播种-现蕾期)

耗水量以 ND 处理最高，NJ、NB 处理次之，分别较 CK 显著提高 22.26%、11.24% 和 6.59%；生育中期(现蕾-膨大期)耗水量 NJ、NB、ND 处理较 CK 分别显著降低 15.00%、10.96% 和 7.21%；生育后期(膨大-收获期)耗水量以 NJ 处理最高，ND 处理次之，分别较 CK 显著提高 121.49% 和 118.97%，NB 处理较 CK 显著降低 49.55%。

平水年,马铃薯生育前期阶段耗水量以 ND 和 CK 最高,NJ、NB 处理分别较 CK 显著降低 11.04% 和 9.60%;而生育中期和后期均以 NJ 处理效果最高,平均较 CK 显著提高 13.91%,其他处理间差异均不显著。

表 2 免耕覆盖处理下各生育阶段马铃薯耗水量

Table 2 Water consumption of potatoes at different growth stages under no-tillage and mulching treatment mm

年份	处理	播种-苗期	苗期-现蕾期	现蕾-块茎形成期	块茎形成-膨大期	膨大-收获期
2014	NB	55.93±1.41b	76.69±5.97c	83.62±4.39a	66.07±4.84c	5.61±0.68b
	NJ	44.20±1.80c	94.21±5.89a	58.68±6.79c	82.50±5.31a	24.63±3.40a
	ND	65.64±4.52a	86.48±4.51b	80.66±9.26b	73.47±8.60b	24.35±0.96a
	CK	54.56±3.98b	69.86±6.11a	105.50±8.39b	60.60±11.49c	11.12±0.88b
2015	NB	17.74±6.24d	109.27±9.49a	106.04±6.77a	98.17±9.94b	36.45±4.12b
	NJ	45.13±3.33b	79.86±5.83b	106.93±1.69a	106.14±13.99a	50.17±4.76a
	ND	65.32±4.72a	75.18±8.31b	93.99±6.54b	108.53±6.10a	39.57±4.55b
	CK	30.84±4.44c	109.66±8.44a	92.28±5.13b	100.92±11.50b	40.97±3.29a
2016	NB	80.83±5.30a	71.41±4.47a	76.96±9.83b	32.74±8.38c	2.80±0.24c
	NJ	38.66±7.23c	58.03±6.56b	82.51±4.50a	58.57±6.88b	38.76±1.98a
	ND	42.16±4.77b	67.50±6.94a	69.54±7.79c	74.50±8.57a	33.54±2.01b
	CK	94.57±5.45a	61.14±5.60a	72.49±7.75a	32.98±3.33c	4.76±0.20c

枯水年,生育前期阶段耗水量以 CK 最高,NJ、ND 处理较 CK 分别显著降低 37.90% 和 29.57%,NB 处理与 CK 无显著差异;生育中期以 ND、NJ 处理分别较 CK 显著提高 36.57% 和 33.76%,而 NB 处理与 CK 无显著差异;生育后期以 NJ 处理最高,ND 处理次之,分别较 CK 显著提高 7.14 和 6.05 倍,而 NB 处理与 CK 无显著差异。

2.2 免耕覆盖对产量构成因素的影响及与土壤水分变化的关系

2.2.1 对产量及产量构成的影响 各处理与对照的马铃薯产量均以相对枯水年(30 774.0 kg/hm²)最高,平水年(14 848.1 kg/hm²)次之,枯水年(12 030.1 kg/hm²)最低)(表 3)。相对枯水年马铃薯产量以 NJ 处理效果最佳,ND 处理次之,较 CK 分别显著提高 51.80% 和 10.75%,NB 处理与 CK 无显著差异;而平水年和枯水年均以 ND 处理最佳,较 CK 分别增产 6.35% 和 71.36%,NJ 处理次之,较 CK 分别显著提高 5.27% 和 51.59%。相对枯水年单株结薯数、单薯质量和单株产量均以 NJ 处理最高,较 CK 分别显著提高 34.85%、12.20% 和 51.85%,其他处理间差异不显著;平水年单株结薯数以 NJ、CK 同为最佳,而单薯质量、单株产量均以 ND 处理最佳,较 CK 分别提高 14.89% 和 6.90%;枯水年单株结薯数、单株产量均以 ND 处理最佳,较 CK 分别显著提高 33.33% 和 72.22%,单薯质量以 NJ 处理效果最佳,较 CK 显著增加 40.98%。可见,免耕覆盖秸秆或免耕覆盖地膜均可提高马铃薯产量及产量构成。

2.2.2 各生育阶段作物耗水量与马铃薯产量、产量构成及水分利用效率的关系 通过相关性分析(表 4)发现,马铃薯播种-苗期耗水量与单株产量和总产

量呈显著负相关,与单株结薯数、单薯质量和水分利用效率呈负相关;苗期-现蕾期耗水量与单株结薯数、单薯质量、单株产量和总产量呈正相关,与水分利用效率呈负相关;现蕾-块茎形成期耗水量与单株质量、单株产量、总产量及水分利用效率呈负相关,与单株结薯数呈正相关;块茎形成-块茎膨大期耗水量与单株结薯数呈负相关,与单薯质量、单株产量、总产量和水分利用效率呈正相关;块茎膨大-收获期耗水量与单株结薯数、单薯质量、单株产量、总产量及水分利用效率呈正相关。可见,马铃薯苗期-现蕾期和块茎形成-收获期耗水量对产量的形成起重要作用,块茎形成-收获期耗水量对水分利用效率起至关重要作用。

表 3 免耕覆盖处理下马铃薯产量构成

Table 3 Potato yield composition under no-tillage and mulching treatment

年份	处理	单株结薯数/ (个·株 ⁻¹)	单薯 质量/g	单株产量/ (kg·株 ⁻¹)	总产量/ (kg·hm ⁻²)
2014	NB	5.6±0.38c	92±6.53a	0.51±0.02c	25 697.8±137.32c
	NJ	8.9±0.52a	92±7.38a	0.82±0.07a	40 781.0±88.51a
	ND	6.7±0.43b	89±6.82a	0.60±0.03b	29 752.4±106.03b
	CK	6.6±0.35b	82±5.79c	0.54±0.01c	26 864.7±152.34c
2015	NB	5.7±0.37b	47±3.47c	0.27±0.01b	13 550.9±103.47b
	NJ	6.2±0.43a	50±3.88b	0.31±0.02a	15 464.7±85.05a
	ND	5.8±0.27b	54±4.32a	0.31±0.01a	15 686.2±79.26b
	CK	6.2±0.54a	47±3.68c	0.29±0.02c	14 690.4±63.75c
2016	NB	2.8±0.09b	66±4.22c	0.19±0.01b	9 329.7±89.22c
	NJ	3.2±0.26b	86±5.93a	0.28±0.01a	13 902.9±76.47b
	ND	4.0±0.31a	80±3.89b	0.31±0.02a	15 716.3±64.38a
	CK	3.0±0.22b	61±4.31b	0.18±0.01b	9 171.4±43.21c

2.3 免耕覆盖对降水利用状况的影响

各处理生育期降水利用效率在相对枯水年以 NJ 处

理最高,ND 处理次之,较 CK 分别显著提高 51.80%和 10.75%;而平水年和枯水年均以 ND 处理最高,NJ 处理次之,平均较 CK 分别显著提高 36.14%和 26.33%,NB 处理与 CK 差异不显著(表 5)。全年降水利用效率在相对枯水年以 NJ 处理最高,ND 处理次之,较 CK 分别显著提高 51.79%和 10.75%;而平水年和枯水年均以 ND 处理最高,NJ 处理次之,较 CK 分别显著提高 35.14%和 25.63%,NB 处理与 CK 差异不显著。水分利用效率在相对枯水年以 NJ 处理最高,较 CK 显著提高 50.52%,其他处理间差异不显著;平水年和枯水年均以 ND 处理最高,NJ 处理次之,平均较 CK 分别显著提高 21.61%和 14.50%,NB 处理与 CK 无显著差异。可见,免耕结合不同覆盖处理均可显著提高土壤水分利用效率和降水利用效率,以相对枯水年增幅最大,枯水年次之,平水年相对较低。

表 4 生育阶段作物耗水量与马铃薯产量及构成因素相关分析
Table 4 Correlation analysis between water consumption, yield, and yield composition factors of potatoes during the growth stages

生育阶段	单株 结薯数	单薯 质量	单株 产量	总产量	水分利用 效率
播种-苗期	-0.861	-0.911	-0.964*	-0.972*	-0.656
苗期-现蕾期	0.168	0.190	0.168	0.147	-0.726
现蕾-形成期	0.088	-0.349	-0.104	-0.136	-0.636
形成-膨大期	-0.095	0.291	0.076	0.107	0.669
膨大-收获期	0.189	0.314	0.280	0.305	0.890

注: *、** 分别表示 $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$ 。

表 5 免耕覆盖处理下的降水利用状况
Table 5 Precipitation utilization status under no-tillage and mulching treatment

年份	处理	生育期降水 利用效率	全年降水 利用效率	水分利用 效率
2014	NB	90.68±5.61c	64.84±5.33c	89.25±6.40b
	NJ	143.90±7.25a	102.90±8.94a	134.05±8.79a
	ND	104.98±6.79b	75.08±5.24b	90.00±5.27b
	CK	94.79±6.33c	67.79±4.96c	89.06±6.59b
2015	NB	40.85±3.26b	29.25±1.38b	36.86±2.51b
	NJ	46.62±2.88a	33.39±2.61a	39.83±3.04a
	ND	47.29±3.94a	33.86±3.07a	41.00±2.61a
	CK	44.29±2.67b	31.72±2.50b	39.21±3.03b
2016	NB	37.56±3.11c	25.28±1.79c	35.24±1.97c
	NJ	55.97±4.29b	37.68±3.05b	50.28±3.28b
	ND	63.27±4.33a	42.59±2.85a	54.71±4.21a
	CK	36.92±2.63c	24.85±1.77c	39.49±2.77c

3 讨论

3.1 免耕覆盖下土壤蓄水效应

已有研究^[6]表明,休闲期免耕覆盖秸秆能增加土

壤水分,而免耕不覆盖容易造成地表硬化;郑凤君等^[12]研究指出,免耕覆盖秸秆还田措施能改善 0~200 cm 土层土壤水热状态,进而提高土壤水分体积分数和储水能力。本研究发现,免耕结合不同覆盖材料均可显著提高 0~200 cm 土层休闲期土壤蓄水量。主要与休闲期降雨及耕作覆盖方式有关,保护性耕作在种前不进行耕作,可减少土壤的扰动,同时覆盖秸秆可存储休闲期降雨,有效减少春季土壤水分蒸发,而传统耕作方式经常扰动土壤,导致土壤蓄水性能降低^[7]。邓妍等^[13]研究发现,夏闲期翻耕覆盖能显著增加播前土壤蓄水量,在小麦生育期蓄水效果较好,尤其在丰水年的蓄水效果最佳。本研究表明,免耕覆盖不同材料均可增加休闲期土壤蓄水量,其中,免耕覆盖地膜处理可显著提高相对枯水年休闲期土壤蓄水量,而免耕覆盖秸秆处理可提高平水年和枯水年休闲期土壤蓄水量。主要是由于免耕能自我疏松,改善土壤通透性,尤其在枯水年蓄水增墒效果较好^[14-15],而休闲期覆盖秸秆可在一定程度上减少地表水分无效蒸发,增加降雨入渗,因此,免耕覆盖秸秆可增加土壤蓄水能力^[15];而免耕覆盖地膜能保持较好的土壤墒情,降低蒸散^[6]。

相关研究^[7]表明,休闲期进行不同耕作措施均可使土壤蓄水效率显著提高,枯水年较为显著;李娟等^[16]研究表明,不同降水年份的保护性耕作制度可提高作物主要生长期的土壤湿度。在干旱和湿润年份,连续免耕处理和免耕/深耕处理具有较高的储水效率。本研究发现,免耕覆盖秸秆在平水年和枯水年休闲期土壤蓄水效率最高,免耕覆盖地膜处理在相对枯水年最高。其原因可能是免耕对土壤耕层扰动较小,结合地膜覆盖在降水较少的年份更能蓄纳雨水,降低水分蒸发,使土壤水分存储于深层土壤当中,从而增加土壤蓄水能力^[7],同时,秋闲期降雨较多,覆盖秸秆能蓄纳水分于深层土壤中,尤其在相对雨水较少的年份效果更佳^[17,5]。刘继龙等^[18]研究发现,免耕覆盖秸秆和传统耕作覆盖秸秆均能显著提高玉米生育后期土壤蓄水量,而免耕覆盖秸秆对土壤水分特性有极显著影响;WANG 等^[19]研究表明,休闲期免耕/深松轮耕结合覆盖措施与传统耕作不覆盖相比,能够显著增加春玉米播种期 0~200 cm 土层土壤蓄水量,在干旱和半干旱年份效果更好。本研究结果表明,免耕与不同覆盖材料相结合能显著提高马铃薯生育期 0~200 cm 土层土壤蓄水量,以免耕覆盖地膜处理在相对枯水年苗期蓄水效果较好,以免耕覆盖秸秆处理在相对枯水年生育中后期、平水年和枯水年全生育期蓄水效果最佳。其原因可能是免耕能改善土壤通透性,更能接纳休闲

期降水^[6];而覆盖地膜和秸秆可降低地表径流量,减少土壤无效水分蒸发,因此,免耕结合覆盖措施能提高降水入渗能力,从而提高土壤蓄水量^[11]。

以往研究^[20-21]表明,覆盖地膜对马铃薯关键生育期土壤水分状况有显著影响,并与当年降水密切相关,免耕覆盖秸秆处理欠水年生长前期 0~100 cm、平水年生长前期 120~180 cm、生长后期 0~40 cm 土层土壤贮水量最高。本研究表明,免耕覆盖秸秆处理对相对枯水年马铃薯关键生育期 100~140 cm、平水年 40~100 cm、枯水年 0~40 和 100~160 cm 土层土壤蓄水效果最佳,免耕覆盖地膜处理对平水年和枯水年 180~200 cm 土层土壤蓄水效果最佳。其原因可能是相对枯水年和枯水年浅层土壤水分较低,水分蓄积在深层土壤中,免耕覆盖地膜能够减少地表因裸露造成的水分无效蒸发,同时,能够改善薯田土层结构和孔隙分布,有利于马铃薯生长,增强薯块用水能力,促进更多有效水分参与马铃薯生长发育进程,进而提高其水分利用效率和产量。常规耕作与秸秆还田的日平均蒸发量差异不显著,其中覆盖免耕最小^[18]。王红丽等^[20]研究表明,耕作覆盖模式能促进马铃薯对水分的利用,盛花期后,马铃薯的生长主要在地下部分,进一步增加土壤水分的消耗。在平水年和欠水年份,薯块膨大期是马铃薯耗水量最高的时期。本研究发现,免耕覆盖秸秆可降低马铃薯生育前期耗水量,增加生育中后期耗水量,平水年和枯水年耗水更高。其原因是免耕结合覆盖能促进作物生育前期的生长,增加生育后期的蒸腾作用^[5]。研究^[21]表明,不同降雨年型下,深松或免耕覆盖秸秆处理可显著降低马铃薯生长前期阶段耗水量,显著提高生长中后期阶段耗水量。本研究结果表明,免耕覆盖地膜处理在相对枯水年和平水年生育前期及枯水年生育中期耗水量最高,对照处理在平水年和枯水年生育前期和相对枯水年生育中期最高,免耕秸秆覆盖在 3 a 研究期间生育后期和平水年生育中期均最高。其原因可能是作物生长前期,土壤裸间蒸发是作物蒸散的主要形式,此时,秸秆覆盖可有效减少土壤水分蒸发,而不覆盖导致土壤蒸发强烈,生育中后期,田间蒸发主要以马铃薯的蒸腾为主,免耕覆盖作物生长较好,耗水量较大^[2]。

3.2 免耕覆盖下马铃薯增产效应

研究^[8,11]表明,保护性耕作措施均可提高旱区马铃薯产量与产量构成;李丹等^[21]研究表明,免耕或深松覆盖秸秆均可提高马铃薯产量,平水年和欠水年以深松覆盖秸秆效果较好,相对欠水年马铃薯产量以免耕覆盖秸秆处理产量最高;邵运辉等^[22]研究表明,双免耕

覆盖小麦秸秆可显著提高土壤水分体积分数,促进冬小麦生长,进而提高冬小麦穗数、穗粒数和千粒重,促进产量提高。本研究发现,平水年和枯水年以免耕覆盖地膜处理马铃薯产量最佳,相对枯水年以免耕覆盖秸秆处理效果最好,免耕覆盖地膜和秸秆处理可显著提高单株结薯数、单薯质量和单株产量。免耕结合覆盖模式可促进马铃薯生育前期对水分的深层利用,为提高单薯质量提供保证,实现冬雨春用,促进块茎膨大,实现增产^[17]。

3.3 免耕覆盖下水分利用特征

苗芳芳等^[15]研究发现,免耕覆盖秸秆能提高相对欠水年水分利用效率,而深松覆盖秸秆能提高平水年和欠水年水分利用效率;于琦等^[14]研究表明,降水年型对冬小麦水分利用效率影响显著,且免耕/免耕/深松处理在干旱和丰水年型水分利用效率更佳。与传统耕作相比,双免耕覆盖秸秆处理可提高玉米和小麦水分利用效率和降水利用效率,较传统耕作分别显著提高 14.07% 和 10.67%^[23]。本研究表明,免耕覆盖秸秆在相对枯水年、免耕覆盖地膜在平水年和枯水年水分利用效率、年降水利用效率和生育期降水利用效率最高。究其原因为相对枯水年全年降水量较少,免耕覆盖秸秆能减少土壤水分的蒸散,可显著提高作物水分利用效率和降水利用效率^[24]。降水分配不均的枯水年和平水年免耕能减少对土壤的扰动,降低水分蒸发,改善土壤通透性,增强贮水能力,同时覆盖地膜能蓄存休闲期降水,降低土壤耗水及浅层水分蒸发,从而提高降水利用效率^[2,7]。

本研究发现,播种-现蕾期耗水量与马铃薯产量呈显著或极显著负相关,马铃薯播种-苗期土壤耗水量与单株产量和总产量呈显著负相关,与前人^[25]研究结果一致。本研究中,免耕覆盖秸秆和地膜均可显著增加马铃薯产量和水分利用效率,但普通塑料地膜降解性低,对土壤造成污染,大量的残膜遗留在土壤中,限制马铃薯根系生长,进而影响产量,不利于农业可持续发展。尤其在宁南旱区主要以节水保水为目的,最好选择秸秆作为覆盖材料,以利于农业可持续发展^[11]。然而,免耕覆盖模式下马铃薯增产机制还与土壤物理结构、温度、养分等因素有关,而本研究中尚未涉及,有待进一步研究,且本文仅涉及 1 个平水年和 2 个枯水年,缺少丰水年型,不能全面分析不同降水年型对马铃薯产量及水分利用效率的影响机制。因此,有必要继续进行长期的定位试验研究,以更好地指导宁南旱作马铃薯农业生产。

4 结论

1) 经过 3 a 耕作覆盖处理后,免耕覆秸秆或覆地膜能显著提高休闲期土壤蓄水量和蓄水效率;免耕覆地膜处理能增加相对枯水年苗期土壤蓄水量,而免耕覆秸秆显著增加相对枯水年生育中后期、平水年和枯水年整个生育期 0~200 cm 土层土壤蓄水量,降低生育前期耗水量,尤其以枯水年效果较佳。

2) 免耕覆秸秆对提高相对枯水年马铃薯产量、降水利用效率和水分利用效果最佳,而免耕覆地膜对平水年和枯水年较好。通过相关性分析,马铃薯苗期-现蕾期和块茎形成-收获期作物耗水量对提高马铃薯产量起重要作用,块茎形成-收获期作物耗水量对提高水分利用效率起决定性作用。可见,在宁南旱区免耕覆盖模式能提高休闲期和马铃薯生育期土壤蓄水量,进而提高马铃薯产量和水分利用效率,以免耕覆盖秸秆处理效果最佳。

参考文献:

- [1] 王晓峰,田霄鸿,陈自惠,等.不同覆盖施肥措施对黄土旱塬冬小麦土壤水分的影响[J].应用生态学报,2009,20(5):1105-1111.
WANG X F, TIAN X H, CHEN Z H, et al. Effects of mulching and fertilization on winter wheat field soil moisture in dry highland region of Loess Plateau[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2009,20(5):1105-1111.
- [2] 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.
- [3] 张玉娇,王浩,王淑兰,等.小麦/玉米轮作旱地长期轮耕的保墒增产效应[J].农业工程学报,2018,34(12):126-136.
ZHANG Y J, WANG H, WANG S L, et al. Soil moisture preservation and improving of crop yield in dry land under long-term wheat/maize rotation[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(12):126-136.
- [4] 孟丹丹,殷淑燕.陕西渭北旱塬地区县域经济发展与生态建设互动研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(1):20-24.
MENG D D, YIN S Y. Interaction of regional economy development and ecological reconstruction in the Weibei arid plateau region[J].Journal of Arid Land Resources and Environment,2010,24(1):20-24.
- [5] 刘连华,陈源泉,杨静,等.免耕覆盖对不同质地土壤水分与作物产量的影响[J].生态学报,2015,34(2):393-398.
LIU L H, CHEN Y Q, YANG J, et al. Effects of no-tillage with straw mulching on soil moisture and crop yield in soils with different textures[J].Chinese Journal of Ecology,2015,34(2):393-398.
- [6] 侯贤清,李荣.免耕覆盖对宁南山区土壤物理性状及马铃薯产量的影响[J].农业工程学报,2015,31(19):112-119.
HOU X Q, LI R. Effects of mulching with no-tillage on soil physical properties and potato yield in mountain area of southern Ningxia[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(19):112-119.
- [7] 孙敏,温斐斐,高志强,等.不同降水年型旱地小麦休闲期耕作的蓄水增产效应[J].作物学报,2014,40(8):1459-1469.
SUN M, WEN F F, GAO Z Q, et al. Effects of farming practice during fallow period on soil water storage and yield of dryland wheat in different rainfall years[J].Acta Agronomica Sinica,2014,40(8):1459-1469.
- [8] 侯贤清,牛有文,吴文利,等.不同降雨年型下种植密度对旱作马铃薯生长、水分利用效率及产量的影响[J].作物学报,2018,44(10):1560-1569.
HOU X Q, NIU Y W, WU W L, et al. Effect of planting density on the growth, water use efficiency and yield of dry-farming potato under different rainfall year types[J].Acta Agronomica Sinica,2018,44(10):1560-1569.
- [9] 张北赢,徐学选,刘文兆,等.黄土丘陵沟壑区不同降水年型下土壤水分动态[J].应用生态学报,2008,19(6):1234-1240.
ZHANG B Y, XU X X, LIU W Z, et al. Dynamic changes of soil moisture in loess hilly and gully region under effects of different yearly precipitation patterns[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2008,19(6):1234-1240.
- [10] 纪文宁,程宏波,李亚伟,等.覆盖方式对旱地马铃薯阶段耗水量特征和产量的影响[J].水土保持学报,2022,36(3):228-235.
JI W N, CHENG H B, LI Y W, et al. Effects of mulching methods on water consumption and yield of potato in dryland farming[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(3):228-235.
- [11] 侯贤清,李荣,韩清芳,等.夏闲期不同耕作模式对土壤蓄水保墒效果及作物水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2012,28(3):94-100.
HOU X Q, LI R, HAN Q F, et al. Effects of different tillage patterns during summer fallow on soil water conservation and crop water use efficiency[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(3):94-100.
- [12] 郑凤君,王雪,李生平,等.免耕覆盖下土壤水分、团聚体稳定性及其有机碳分布对小麦产量的协同效应[J].中国农业科学,2021,54(3):596-607.
ZHENG F J, WANG X, LI S P, et al. Synergistic effects of soil moisture, aggregate stability and organic

- carbon distribution on wheat yield under no-tillage practice [J]. *Agricultural Science in China*, 2021, 54(3): 596-607.
- [13] 邓妍,高志强,孙敏,等.夏闲期深翻覆盖对旱地麦田土壤水分及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1): 132-138.
DENG Y, GAO Z Q, SUN M, et al. Effects of deep plowing and mulch in fallow period on soil water and yield of wheat in dryland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1): 132-138.
- [14] 于琦,李军,周栋,等.不同降水年型黄土旱塬冬小麦免耕与深松轮耕蓄墒增收效应[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(11): 1870-1882.
YU Q, LI J, ZHOU D, et al. Effects of no-tillage/subsoiling rotational tillage system on increasing soil water storage and crop yield under different precipitation patterns of winter wheat in the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(11): 1870-1882.
- [15] 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.
- [16] 李娟,王丽,李军,等.轮耕对渭北旱塬玉米连作系统土壤水分和作物产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 110-118.
LI J, WANG L, LI J, et al. Effects of rotational tillage on soil water content and crop yield of spring maize system on Weibei dryland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16): 110-118.
- [17] 姚宝林,施炯林,席琳乔.河西内陆河灌区覆盖免耕的农田水分效应[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(1): 98-101.
YAO B L, SHI J L, XI L Q. Effects of no-tillage with straw mulch on farmland soil water in Hexi Corridor[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(1): 98-101.
- [18] 刘继龙,李佳文,周延,等.秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 333-339.
LIU J L, LI J W, ZHOU Y, et al. Effects of straw mulching and tillage on soil water characteristics [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7): 333-339.
- [19] WANG S L, WANG H, ZHANG Y H, et al. The influence of rotational tillage on soil water storage, water use efficiency and maize yield in semi-arid areas under varied rainfall conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 203: 376-384.
- [20] 王红丽,张绪成,于显枫,等.黑色地膜覆盖的土壤水热效应及其对马铃薯产量的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 5215-5226.
WANG H L, ZHANG X C, YU X F, et al. Effect of using black plastic film as mulch on soil temperature and moisture and potato yield[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5215-5226.
- [21] 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. Effect of tillage combined with straw mulching on water consumption characteristics and yield of potato under different precipitation years[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2): 275-286.
- [22] 邵运辉,李俊红,岳俊芹,等.旱作区双免耕覆盖下冬小麦旗叶光合特性、根系分布及产量研究[J]. *麦类作物学报*, 2020, 40(7): 843-849.
SHAO Y H, LI J H, YUE J Q, et al. Study on photosynthetic characteristics and root distribution of winter wheat flag leaf and yield under double no-tillage with mulch in dryland[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(7): 843-849.
- [23] 李俊红,丁志强,杨妮娜,等.双免耕覆盖对旱地作物产量及水分利用效率的影响[J]. *河南农业科学*, 2014, 43(12): 65-68.
LI J H, DING Z Q, YANG N N, et al. Effects of double no-tillage with mulch on crop yield and water use efficiency in dry land[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, 43(12): 65-68.
- [24] 谢军红,李玲玲,张仁陟,等.一膜两年覆盖条件下耕作方法对旱作玉米产量及土壤物理性状的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 184-189.
XIE J H, LI L L, ZHANG R Z, et al. Effect of tillage system on rain-fed maize yield and soil physical characteristics for one film used two years[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(3): 184-189.
- [25] 钱玉平,田慧慧,程宏波,等.秸秆覆盖及播种方式对马铃薯耗水特性和产量的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(6): 826-834.
QIAN Y P, TIAN H H, CHENG H B, et al. Effects of straw mulching and sowing methods on water consumption characteristics and yield of potato in arid region of Northwest China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(6): 826-834.