

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

李 丹, 王翻龙, 张 龙, 赵富贵, 李 荣, 侯贤清

(宁夏大学农学院, 银川 750021)

摘要: 为探索不同降水年型下耕作结合秸秆覆盖措施对旱作马铃薯生育期土壤贮水量、作物耗水特征和产量形成的影响, 连续 3 年在旱作区秋作物收获后通过设置不同耕作方式(免耕、深松、翻耕)结合秸秆覆盖进行大田试验研究。结果表明, 经过 3 年耕作覆盖处理后, 免耕、深松结合秸秆覆盖能显著降低 0—40 cm 层土壤容重, 提高土壤有机质含量。保护性耕作结合秸秆覆盖措施可显著提高马铃薯生育期 0—200 cm 层土壤贮水量, 相对欠水年和欠水年马铃薯全生育期土壤贮水量均以深松覆秸秆处理最高, 分别较翻耕不覆盖显著提高 15.80% 和 20.80%, 平水年以免耕覆秸秆处理最高, 较翻耕不覆盖显著提高 14.78%。其中以深松覆秸秆处理对相对欠水年生长前期 0—60 cm 土层和中期 120—200 cm 土层、平水年前期 20—100 cm 土层及欠水年生育期 0—80 cm 土层土壤蓄水效果最佳。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、耗水模系数和耗水强度, 显著提高生长中后期阶段耗水量、耗水模系数和耗水强度, 尤其在欠水年效果较好。与翻耕不覆盖相比, 深松覆秸秆处理更有利于增加马铃薯干物质质量, 尤其在欠水年生长中期增加地上部干物质质量和在平水年生长中后期增加地下部干物质质量效果明显。相对欠水年马铃薯产量和水分利用效率均以免耕覆秸秆处理效果最佳, 分别较翻耕不覆盖显著提高 51.82% 和 50.52%, 平水年和欠水年均以深松覆秸秆处理效果最佳, 平水年分别较翻耕不覆盖显著提高 36.69% 和 29.48%, 欠水年分别显著提高 87.46% 和 62.31%; 深松覆秸秆处理对提高相对欠水年和平水年商品薯率效果最好, 免耕覆秸秆处理对提高欠水年商品薯率效果最好, 分别较翻耕不覆盖显著提高 12.88%, 14.58% 和 26.18%。相关性分析发现, 耕作覆秸秆处理下土壤容重降低, 有机质含量增加, 使土壤保水性能得到改善, 协同提高马铃薯产量; 且不同降水年型下生育期土壤水分特征对提高马铃薯产量起至关重要的作用, 尤其在相对欠水年生长中后期土壤水分与产量呈显著或极显著正相关。可见, 免耕或深松结合秸秆覆盖措施能改善马铃薯生育期土壤水分状况, 调控作物耗水, 从而增加干物质质量, 有利于马铃薯产量和水分利用效率的提高, 以深松覆盖秸秆处理效果最佳。

关键词: 耕作结合秸秆覆盖; 耗水特征; 马铃薯产量; 水分利用效率; 降水年型

中图分类号: S532; S233

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)02-0275-12

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.02.032

Effect of Tillage Combined with Straw Mulching on Water Consumption Characteristics and Yield of Potato Under Different Precipitation Years

LI Dan, WANG Fanlong, ZHANG Long, ZHAO Fugui, LI Rong, HOU Xianqing

(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021)

Abstract: In order to explore the effects of tillage combined with straw mulching on soil water storage, crop water consumption characteristics and yield formation of upland potato growth period in different precipitation year types, the field experiment was conducted by setting different tillage methods (no-tillage, subsoiling, and ploughing tillage) combined with straw mulching after autumn crop harvest in dryland area for three consecutive years. The results showed that after three years of tillage and mulching treatment, no-tillage, subsoiling combined with straw mulching could significantly reduce soil bulk density and increase soil organic matter content in 0—40 cm layer. Conservation tillage combined with straw mulching could significantly

收稿日期: 2022-07-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(31860362, 32160515); 宁夏自然科学基金项目(2021AAC03003, 2022AAC03061)

第一作者: 李丹(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事旱地保护性耕作技术研究。E-mail: ld1104916@163.com

通信作者: 侯贤清(1981—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事旱作农业节水技术研究。E-mail: houxianqing1981@126.com

improve soil water storage in 0—200 cm soil layer during potato growth period. The soil water storage in subsoiling with straw mulching treatment was the highest in the whole potato growth period in the relative less water year and the less water year, which was significantly increased by 15.80% and 20.80% than that of ploughing tillage without mulching, respectively. In the normal year, no tillage with straw mulching treatment was the highest, which was significantly increased by 14.78% than that of ploughing tillage without mulching. Among them, subsoiling with straw mulching treatment had the best soil water storage effect in 0—60 cm soil layer in early growth stage and 120—200 cm soil layer in middle growth stage of the relative less water year, 20—100 cm soil layer in early normal year and 0—80 cm soil layer in growth stage of the relative less water year. Subsoiling or no-tillage with straw mulching treatment could significantly reduce the water consumption, water consumption modulus coefficient and water consumption intensity at the early stage of potato and significantly increase the water consumption, water consumption modulus coefficient and water consumption intensity at the middle and late stages of potato especially in the less water year. Compared with ploughing tillage without mulching, subsoiling with straw mulching was more conducive to the increase of dry matter mass of potato, especially in the middle growth stage of less water years and in the middle and late growth stages of normal years. In the relative less water year, potato yield and water use efficiency of no tillage with straw mulching treatment were the best, which were significantly increased by 51.82% and 50.52% than that of ploughing tillage without mulching respectively. In the normal year and the less water year, the effect of subsoiling with straw mulching treatment was the best, which were significantly increased by 36.69% and 29.48% than that of ploughing tillage without mulching in the normal year, and significantly increased by 87.46% and 62.31% respectively in the less water year. Subsoiling with straw mulching treatment had the best effect on increasing the commodity rate of potato in the relative less water year and the normal year, and no tillage with straw mulching treatment had the best effect on increasing the commodity rate of potato in the less water year, which was significantly increased by 12.88%, 14.58% and 26.18%, respectively, compared with ploughing tillage without mulching. Correlation analysis showed that soil bulk density and organic matter content increased under the tillage with straw mulching, which improved soil water retention performance and the potato yield. The soil moisture characteristics played a crucial role in improving potato yield during the growth period of potato under different precipitation years, especially in the middle and late growth period of potato in relative less water years, soil moisture was significantly or extremely significantly positively correlated with the yield. It could be seen that no-tillage or subsoiling combined with straw mulching could improve the soil moisture status during potato growth period, regulate crop water consumption and increase the dry matter accumulation, which was beneficial to improve the potato yield and water use efficiency, and the subsoiling with straw mulching has the best effect.

Keywords: tillage combined with straw mulching; water consumption characteristics; potato yield; water use efficiency; precipitation year type

马铃薯是中国主粮之一,具有丰富的营养价值和药用价值,其种植面积仅次于玉米、小麦和水稻^[1]。马铃薯以抗旱、高产、高效的特色优势,成为宁夏南部旱作区(简称“宁南旱区”)农民抗旱增收的重要粮食和经济作物^[2]。自然降雨是该区主要的农业生产用水方式,但由于季节性干旱胁迫、有效降水较少、蒸发强烈、水资源短缺等因素严重限制旱作区作物生长,以及产量的提高^[3]。同时传统耕作造成土壤结构破坏,致使土壤有机质分解加速和养分流失,耕地质量下降,导致土壤保水能力下降,加速表层土壤水分的

流失,水分利用效率降低,严重限制宁南旱区马铃薯产业的可持续发展^[4]。因此,采取有效的蓄水保墒措施,充分利用有效降水,改善土壤水分供应状况,是提高马铃薯产量的关键。保护性耕作措施可改善耕作性质,减少水分无效蒸发,提高作物水分利用效率。免耕和深松是已知的最有效的耕作方法,免耕可减少土壤扰动,降低土壤容重,提高团聚体稳定性等,而深松可通过消除土壤压实来改善土壤结构和水分利用效率^[5-6]。秸秆覆盖在中国半干旱地区马铃薯生产中应用广泛,可以通过增加降雨入渗,减少土壤蒸发,改

善作物生长环境等来保持土壤水分,对提高作物生长和产量具有显著影响^[7]。免耕和深松结合秸秆覆盖措施能改善土壤结构,最大程度降低地表水分蒸发,促进自然降水多蓄少耗,改善马铃薯生育时期土壤水热及养分环境,显著提高马铃薯生物量,从而达到稳产高产的目的^[6]。孙敏等^[8]研究表明,休闲期深翻或深松耕作有利于旱地小麦蓄雨保墒,提高土壤蓄水效率,尤其在枯水年效果较好;韩固等^[9]研究表明,深松覆秸秆有利于提高生育期土壤水分含量,调控马铃薯阶段耗水量,从而增加马铃薯干物质累积,实现作物的高产和水分高效利用。因此,合理耕作覆盖模式对调控作物耗水过程和产量的形成及提高降水利用效率具有重要意义^[10]。目前,前人研究多注重于单一耕作方式或覆盖方式对土壤水分保蓄和作物产量的影响,而对不同降水年型下保护性耕作结合秸秆覆盖措施对马铃薯生育期土壤水分时空变化、作物阶段耗水特征及产量影响的研究方面尚不多见。本研究在秋作物收获后,连续 3 年通过设置不同耕作方式(免耕、深松、翻耕)结合秸秆覆盖进行大田试验研究,分析不同降水年型下耕作结合秸秆覆盖措施对马铃薯生育期土壤贮水量、作物阶段耗水特征、生物量、产量及水分利用效率的影响,以期筛选出适合宁南旱区土壤蓄水保墒的耕作模式,为该区马铃薯实现高产增产提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2013 年 9 月至 2016 年 10 月在宁夏彭阳县

城阳乡长城塬旱作农业试验站(106°32′—106°58′E,35°41′—36°17′N,海拔 1 800 m)进行。该地位于宁夏南部山区,年际蒸发量 1 050 mm,年均降水量 431 mm,降雨集中发生在 7—9 月,年均气温 8.1 ℃,无霜期 155 天,属温带半干旱大陆性季风气候。试验期内月降雨量分布见图 1。2014—2016 年马铃薯整个生育期(5—9 月)降雨量分别为 283.4,331.7,248.4 mm。结合 40 年(1977—2016 年)年均降水量(430.5 mm)及生育期平均降水量(337.8 mm)可知,2014 年为相对欠水年,2015 年为平水年,2016 年为欠水年。试验地土壤类型为黄绵土,耕层(0—40 cm)含土壤有机质 7.5 g/kg,速效氮 58.6 mg/kg,有效磷 8.4 mg/kg,速效钾 150.0 mg/kg,土壤肥力较低。

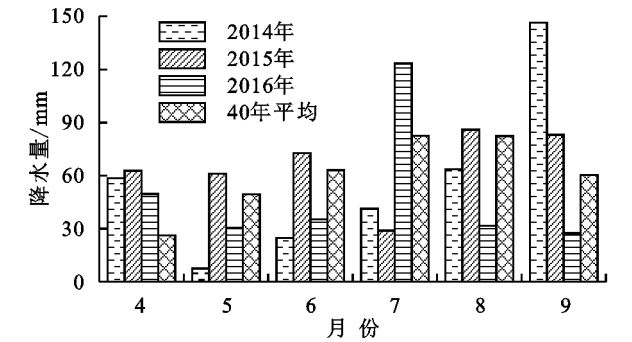


图 1 试验期间月降雨量和 40 年平均降水量

1.2 试验设计

试验始于 2013 年 10 月初秋作收获后,采用随机区组设计,设免耕覆盖秸秆(NJ)、深松覆盖秸秆(SJ)、翻耕覆盖秸秆(CJ)和对照(传统翻耕不覆盖,CK)4 个处理,每个处理重复 3 次,各小区长宽为 9 m×4 m。试验耕作覆盖处理措施见表 1。

表 1 试验设计

处理	处理方式
免耕覆盖秸秆(NJ)	秋作收获后进行表土处理,全年不耕作;玉米秸秆采用全生育期整秆覆盖,覆盖量 9 000 kg/hm ² ,覆盖厚度 5~8 cm
深松覆盖秸秆(SJ)	秋作收获后采用中国农业大学研制的冀铲式深松机进行间隔深松,耕作深度 30~35 cm,间隔 40 cm;覆盖处理同 NJ
翻耕覆盖秸秆(CJ)	秋作收获后采用铧式犁拖拉机耕翻土壤,耕作深度 15~20 cm,耕后耙耱各 1 次;覆盖处理同 NJ
传统翻耕不覆盖(CK)	耕作方法同 CJ;不覆盖

播种前结合秋耕实行秋施肥,各处理统一施肥水平为农家肥(牛粪)30 t/hm²,尿素 150 kg/hm²,磷酸二铵 150 kg/hm²,硫酸钾 150 kg/hm²,试验期间无灌溉,人工除草。马铃薯品种为陇薯 3 号,平作栽培,宽窄行种植(宽行 60 cm,窄行 40 cm),株距 40 cm,穴播后少量覆土,种植密度 5 万株/hm²。马铃薯分别于 2014 年 4 月 28 日播种,10 月 3 日收获;2015 年 5 月 2 日播种,9 月 23 日收获;2016 年 5 月 4 日播种,10 月 2 日收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤容重和有机质含量 在 2013 年试验处理前及 2016 年马铃薯收获后,每小区以“S”形布置 5 个采样点,按 0—20,20—40 cm 层用环刀取样,采用环刀法测定各土层土壤容重;用自封袋分别采集各试验区 0—20,20—40 cm 层土样,带回实验室风干、磨细,过 0.25 mm 筛,采用重铬酸钾容量—外加热法测定土壤有机质含量^[6]。

1.3.2 土壤水分 采用烘干法测定马铃薯播种后

30,60,90,120,150 天种植行 0—200 cm 层土壤质量含水量,每 20 cm 层测定 1 次,并计算 0—200 cm 层土壤贮水量^[11]。

$$W=10h\lambda a$$

(1)

式中: W 为土壤贮水量(mm); h 为土层深度(cm); λ 为土壤容重(g/cm^3); a 为土壤质量含水量(%);10 为换算系数。

1.3.3 耗水特征^[12] 作物阶段耗水量计算公式为:

$$ET_i=\Delta W_i+P_i$$

(2)

式中: ET_i 为第 i 生育阶段的耗水量(mm); ΔW_i 为第 i 生育阶段初始时和结束时的土壤贮水量之差(mm); P_i 为第 i 生育阶段降水量(mm);土壤贮水量及不同时段耗水量均以 0—200 cm 层土壤质量含水量计算。

$$\text{耗水模系数}=ET_i/ET$$

(3)

式中: ET_i 为作物各生育阶段耗水量(mm)。

$$\text{耗水强度}=ET_i/d$$

(4)

式中: d 为作物某个生育阶段天数。

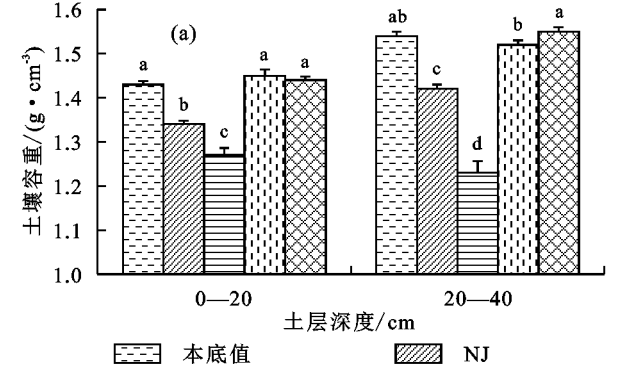
1.3.4 干物质量 分别于马铃薯播后 30,60,90,120,150 天取长势均匀的植株 5 株,并按地上部和地下部鲜样分别在 105 ℃ 下杀青 30 min,75 ℃ 下烘干至恒重。

1.3.5 水分利用效率^[13]

$$WUE=Y/ET$$

(5)

式中: WUE 为水分利用效率 [$\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{mm})$]; Y 为作物总产量(kg/hm^2); ET 为作物耗水量(mm)。



1.3.6 马铃薯产量 于收获期测定各小区马铃薯产量,根据吕文河等^[14] 研究中马铃薯商品薯分级标准分别记录大中薯(单薯质量大于 75 g)和小薯(单薯质量小于 75 g)质量,并计算其商品薯率。

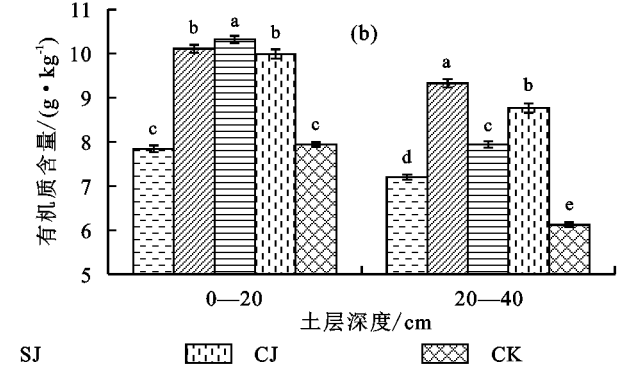
1.4 数据处理

利用 Microsoft Office Excel 2016 进行数据处理,最小显著差异法(LSD)进行显著性检验($p<0.05$),采用 Origin 2021 进行制图和 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 耕作结合秸秆覆盖对土壤容重和有机质含量的影响

由图 2 可知,2016 年马铃薯收获期,不同耕作结合秸秆覆盖对 0—40 cm 层土壤容重和有机质含量影响显著。经过 3 年耕作覆盖处理后,CJ、CK 处理土壤容重均有所增加,但与试验处理前(本底值)差异不显著。耕作覆盖处理下 0—20,20—40 cm 土层均以 SJ 处理土壤容重降幅最大,分别较 CK 处理显著降低 11.81% 和 20.65%。各处理 0—40 cm 层土壤有机质含量(除 CK 处理 20—40 cm 土层)较试验处理前均有所增加,且 0—20 cm 层增幅明显高于 20—40 cm 层。不同耕作结合秸秆覆盖处理下 0—20,20—40 cm 层土壤有机质含量分别以 SJ 和 NJ 处理较高,分别较 CK 处理显著提高 29.97% 和 52.45%。可见,深松覆秸秆处理可有效增加 0—20 cm 层土壤有机质含量,降低土壤容重,使土壤结构得到显著改善。



注:不同小写字母表示不同处理下差异显著($p<0.05$)。下同。

图 2 各处理 0—40 cm 各层土壤容重和有机质含量

2.2 耕作结合秸秆覆盖对马铃薯生育期土壤水分的影响

2.2.1 马铃薯生育期 0—200 cm 层土壤贮水量变化特征 不同降水年型下不同耕作结合秸秆覆盖对马铃薯生育期 0—200 cm 层土壤贮水量影响显著(图 3)。随播后天数的增加,相对欠水年和平水年各处理 0—200 cm 层土壤贮水量呈先减少后增加的变化趋势,欠水年呈逐渐减少的变化趋势。3 年试验期间,不同耕作方式覆盖秸秆处理 0—200 cm 层土壤贮水量均较翻耕不覆

盖处理显著提高,其中相对欠水年和欠水年 SJ 处理马铃薯全生育期土壤贮水量平均较 CK 处理分别显著提高 15.80% 和 20.80%,平水年 NJ 和 SJ 处理平均较 CK 处理分别显著提高 14.78% 和 12.66%。

马铃薯生长前期(播后 0~60 天)降水较少(2014 年为 32.2 mm,2015 年为 133.7 mm,2016 年为 65.9 mm),各处理土壤贮水量存在差异,其中播后 30 天,3 年均以 SJ 处理保水效果最好,较 CK 处理分别显著提高 12.99%,13.29% 和 26.22%;播后 60 天,相对

欠水年以 SJ 处理保水性较好,较 CK 处理显著提高 18.63%,而平水年和欠水年均以 NJ 处理贮水量最高,较 CK 处理分别显著提高 17.67%和 26.40%。

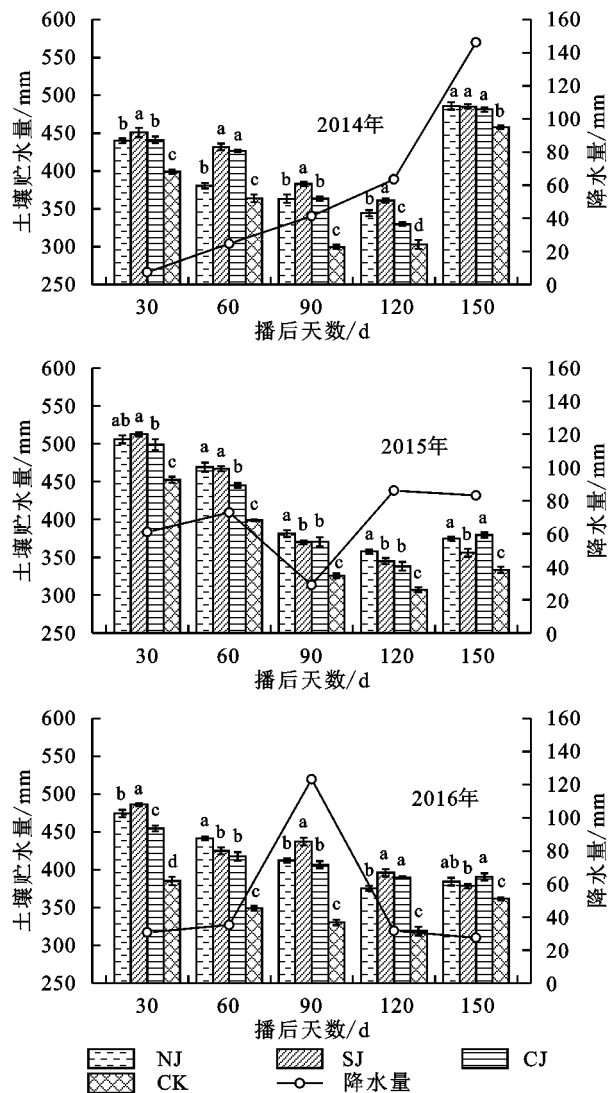


图3 各处理马铃薯生育期0—200 cm层土壤贮水量

生长中期(播后60~120天)为马铃薯生长关键期,尽管降水量(2014年为104.9 mm,2015年为115 mm,2016年为155 mm)有所增加,但随着气温升高,需水量增大,且蒸发强烈,各处理在该阶段土壤贮水量有所降低,相对欠水年和欠水年各处理中 SJ 处理贮水量最高,较 CK 处理分别显著提高 23.44%和 28.36%,平水年以 NJ 处理最高, SJ 处理次之,较 CK 处理分别显著提高 16.83%和 12.99%。生长后期(播后120~150天),植株需水量减少,由于相对欠水年和平水年降水(2014年为146.3 mm,2015年为83 mm)的进一步补充,各处理0—200 cm层土壤贮水量有所增加,而欠水年降水(27.5 mm)减少,各处理土壤贮水量仍处于较低水平,其中相对欠水年 NJ、SJ 和 CJ 处理间差异不显著,较 CK 处理分别显著提高 6.12%,5.96%和 5.14%,平水年和欠水年以 CJ 和

NJ 处理保水效果较好,较 CK 处理分别显著提高 12.94%,11.64%(平水年)和 6.67%,5.24%(欠水年)。可见,SJ 处理在相对欠水年和欠水年生长前中期及平水年生长前期效果最佳,NJ 处理在相对欠水年和欠水年生长后期及平水年生长中后期土壤贮水量效果较好。

2.2.2 马铃薯生育期0—200 cm层土壤贮水量垂直变化特征 由图4可知,不同降水年型下各处理0—200 cm层土壤贮水量垂直变化受不同耕作覆盖措施影响较大。马铃薯生长前期,无论何种降水年型各处理0—200 cm层土壤贮水量垂直变化整体均表现为随土层的加深呈先升后降的变化趋势,其中相对欠水年 SJ 处理0—60 cm层土壤贮水量最高,较 CK 处理显著提高 22.80%,平水年 SJ 处理20—100 cm层土壤贮水量最高,较 CK 处理显著提高 22.80%,欠水年 SJ 和 NJ 处理0—100 cm层土壤贮水量较 CK 分别显著提高 32.77%和 30.66%。

生长中期马铃薯耗水加剧,0—200 cm各土层土壤贮水量均有所减少,相对欠水年和平水年各处理0—200 cm层土壤贮水量垂直变化整体均表现为随土层的加深呈先降后升的变化趋势,而欠水年表现为随土层的加深而逐渐降低。其中相对欠水年 SJ 处理120—200 cm层土壤贮水量最高,较 CK 处理显著提高 24.56%,平水年 NJ 处理120—180 cm层土壤贮水量最高,较 CK 处理显著提高 26.65%,欠水年 SJ 处理0—80 cm层土壤贮水量最高,较 CK 处理显著提高 23.88%。

生长后期相对欠水年各处理0—200 cm层土壤贮水量垂直变化整体表现为随土层的加深呈先升后降的变化趋势,SJ 处理0—100 cm层土壤贮水量较 CK 处理显著提高 8.92%,而 NJ、CJ 处理与 CK 处理间差异均不显著;平水年各处理0—200 cm层土壤贮水量垂直变化整体表现为随土层的加深呈先降后升的变化趋势,NJ 处理0—40 cm层土壤贮水量最高,较 CK 处理显著提高 19.30%;欠水年各处理0—200 cm层土壤贮水量垂直变化表现为随土层的加深呈先降后升再降的变化趋势,其中 SJ 处理0—80 cm层较 CK 处理显著提高 5.84%,CJ 处理80—180 cm层土壤贮水量较 CK 处理显著提高 11.20%。可见,深松覆秸秆处理对相对欠水年生长前期0—60 cm层和中期120—200 cm层、平水年前期20—100 cm层及欠水年生育期0—80 cm层土壤蓄水效果最佳。

2.3 耕作结合秸秆覆盖对马铃薯阶段耗水特征的影响

2.3.1 阶段耗水量 不同降水年型对马铃薯阶段耗水

量影响显著(表 2),相对欠水年和平水年马铃薯阶段耗水量表现为生长中期>生长前期>生长后期,而欠水年则表现为生长前期>生长中期>生长后期。3 年试验间各处理覆盖处理可降低马铃薯生长前期耗水量,提高生长中后期耗水量。相对欠水年,马铃薯生长前期阶段耗水量以 SJ 处理最低,较 CK 处理显著降低 31.83%,NJ 处理最高,较 CK 处理显著提高 10.63%;生长中期阶段耗水量以 NJ 处理较 CK 处理显著降低 14.97%,CJ 处理较 CK 处理显著提高 21.05%;生长后期以 SJ、NJ 处理阶段耗水量分别较 CK 处理显著提高 277.34%和 121.49%。在平水年,生长前期阶段耗水量以 SJ 处理最低,CJ 和 CK 处理最高,SJ 处理较 CK 处理显著

降低 17.57%;生长中后期阶段耗水量均以 SJ 处理最高,分别较 CK 处理显著提高 15.68%和 37.10%。欠水年,生长前期以 NJ 处理阶段耗水量较 CK 处理显著降低 37.90%;生长中期以 NJ 处理最高,较 CK 处理显著提高 33.76%,其他处理间差异不显著;生长后期以 SJ 处理较 CK 处理显著提高 1264.71%。相对欠水年全生育期耗水量以 CJ 处理最高,NJ 处理次之,分别较 CK 处理显著提高 2.27%和 0.62%,平水年和欠水年均以 SJ 处理最高,分别较 CK 处理显著提高 5.55%和 15.50%。可见 SJ 或 NJ 处理可显著降低生长前期阶段耗水量,显著提高生长中后期阶段耗水量,尤其在欠水年效果较好。

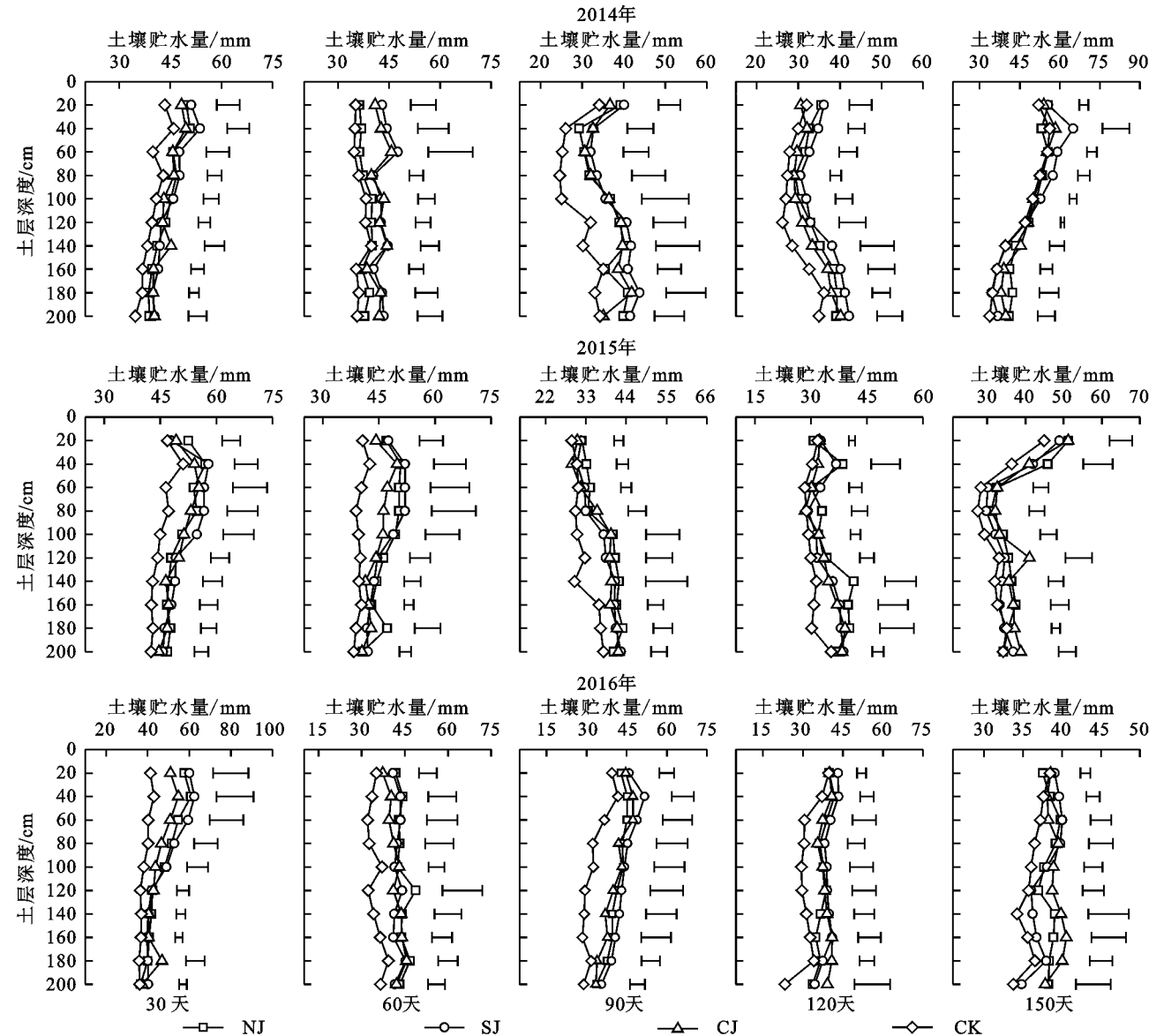


图 4 各处理 0—200 cm 各土层土壤贮水量

2.3.2 耗水模系数和耗水强度 各处理马铃薯全生育期内耗水模系数和耗水强度与阶段耗水量的整体变化趋势相同,均为相对欠水年和平水年表现为生长中期>生长前期>生长后期,欠水年表现为生长前期>生

长中期>生长后期(表 2)。相对欠水年,生长前期耗水模系数和耗水强度均以 NJ 处理最高,SJ 处理最低,生长中期以 CJ 处理最高,SJ 处理次之,NJ 处理最低,生长后期以 SJ 处理最高,NJ 处理次之。平水年,生长前

期以 CK 和 CJ 处理最高,SJ 处理最低,生长中期和生长后期均以 SJ 处理最高,NJ 处理次之。欠水年,生长前期以 CK 处理最高,NJ 处理最低,生长中期以 NJ 处理最高,SJ 处理最低,生长后期以 SJ 处理最高。可见,SJ 处理可显著降低相对欠水年和平水年

马铃薯生长前期耗水模系数和耗水强度,显著提高平水年生长中后期及相对欠水年、欠水年生长后期耗水模系数和耗水强度,NJ 处理可显著降低相对欠水年生长中期和欠水年生长前期耗水模系数和耗水强度,显著提高欠水年生长中期耗水模系数和耗水强度。

表 2 各处理马铃薯播后不同阶段耗水特征比较

年份	处理	阶段耗水量/mm				耗水模系数/%			耗水强度/(mm·d ⁻¹)		
		0~60 d	60~120 d	120~150 d	0~150 d	0~60 d	60~120 d	120~150 d	0~60 d	60~120 d	120~150 d
2014	NJ	137.64a	141.23d	24.63b	303.50ab	45.35a	46.53d	8.12b	2.29a	2.35d	0.82b
	SJ	84.82d	175.78b	41.96a	302.56ab	28.03c	58.10b	13.87a	1.41d	2.93b	1.40a
	CJ	92.37c	201.06a	15.06c	308.49a	29.94c	65.18a	4.88c	1.54c	3.35a	0.50c
	CK	124.42b	166.10c	11.12d	301.64b	41.25b	55.07c	3.69d	2.07b	2.77c	0.37d
2015	NJ	124.99b	213.07b	50.17b	388.23b	32.19b	54.88b	12.92b	2.08b	3.55b	1.67b
	SJ	115.81c	223.50a	56.17a	395.48a	29.28c	56.51a	14.20a	1.93c	3.73a	1.87a
	CJ	140.50a	208.39b	25.87d	374.76c	37.49a	55.61ab	6.90d	2.34a	3.47b	0.86d
	CK	140.50a	193.20c	40.97c	374.67c	37.50a	51.57c	10.93c	2.34a	3.22c	1.37c
2016	NJ	96.69d	141.08a	38.76c	276.53b	34.97d	51.02a	14.02c	1.61d	2.35a	1.29c
	SJ	138.02b	104.18b	64.96a	307.16a	44.93b	33.92c	21.15a	2.30b	1.74b	2.17a
	CJ	114.77c	103.22b	46.79b	264.78c	43.35c	38.98b	17.67b	1.91c	1.72b	1.56b
	CK	155.71a	105.47b	4.76d	265.94c	58.55a	39.66b	1.79d	2.60a	1.76b	0.16d

2.4 耕作结合秸秆覆盖下马铃薯生育期地上、地下部干物质积累动态

由图 5 可知,各处理马铃薯地上部干物质质量在不同降水年型下表现为相对欠水年高于平水年和欠水年,相对欠水年较平水年和欠水年分别显著提高 26.20%和 15.43%。随生育期的推进马铃薯地上部干物质质量呈先增后减的变化趋势。生长前期,相对欠水年和平水年地上部干物质累积量均以 NJ 处理最高,SJ 处理次之,NJ、SJ 处理较 CK 处理分别显著提高 73.97%,72.66%(相对欠水年)和 105.27%,93.92%(平水年),欠水年以 SJ、NJ 处理较 CK 处理分别显著提高 107.78%和 76.93%。生长中期,各处理马铃薯地上部干物质质量均达到最高,且 3 年试验内均以 SJ 处理最高,较 CK 处理分别显著提高 51.08%,57.50%和 57.33%。生长后期,相对欠水年和欠水年均以 NJ 处理最高,较 CK 处理分别显著提高 55.79%和 162.02%,平水年以 SJ 处理最高,NJ 处理次之,较 CK 处理分别显著提高 36.05%和 33.81%。可见,耕作覆盖措施可显著增加马铃薯地上部干物质质量,以 SJ 处理在欠水年马铃薯生长中期效果较好。

各处理马铃薯生育期地下部干物质质量在不同降水年型下表现为相对欠水年>平水年>欠水年,相对欠水年较平水年和欠水年分别显著提高 121.14%和 200.25%,随生育期的推进地下部干物质质量呈逐渐上升趋势。生长前期,相对欠水年和平水年地下部干

物质质量均以 SJ 处理最高,较 CK 处理分别显著提高 15.16%和 47.97%,欠水年以 NJ 处理最高,CJ 处理次之,较 CK 处理分别显著提高 26.93%和 15.45%。生长中期和生长后期,3 年试验期内干物质质量均以 SJ 处理最高,平均较 CK 处理分别显著提高 45.05%,103.30%和 91.61%。可见,SJ 处理更有利于增加马铃薯地下部干物质质量,尤其在平水年马铃薯生长中后期效果更明显。

2.5 耕作结合秸秆覆盖对马铃薯产量与水分利用效率的影响

由表 3 可知,不同降水年型对马铃薯产量、商品薯率和水分利用效率影响不同,相对欠水年的马铃薯产量、商品薯率和水分利用效率均显著高于平水年和欠水年的,这是由于相对欠水年马铃薯生长后期降雨量的增加,有效促进了水分利用效率的提高和干物质累积,从而增加马铃薯产量和商品薯率。而平水年和欠水年关键生育期降雨量较少,导致水分利用效率、产量和商品薯率降低,但各处理间不同耕作覆盖较传统翻耕不覆盖均有不同程度的增加。马铃薯产量和水分利用效率在相对欠水年均以 NJ 处理最高,SJ 处理次之,与 CK 处理相比,马铃薯产量分别显著提高 51.82%和 50.52%,水分利用效率分别显著提高 43.41%和 42.94%;平水年和欠水年产量和水分利用效率均以 SJ 处理最高,与 CK 处理相比,平水年分别显著提高 36.69%和 29.48%,欠水年分别显著提高 87.46%和 62.31%。马铃薯商品薯率在相

对欠水年和平水年均以 SJ 处理最高,分别较 CK 处理显著提高 12.88%和 14.58%,欠水年以 NJ 处理最高,SJ 处理次之,分别较 CK 处理显著提高 26.18%

和 21.95%。可见,免耕或深松覆秸秆处理对提高商品薯率和水分利用效率效果显著,有利于马铃薯增产,以相对欠水年效果最佳。

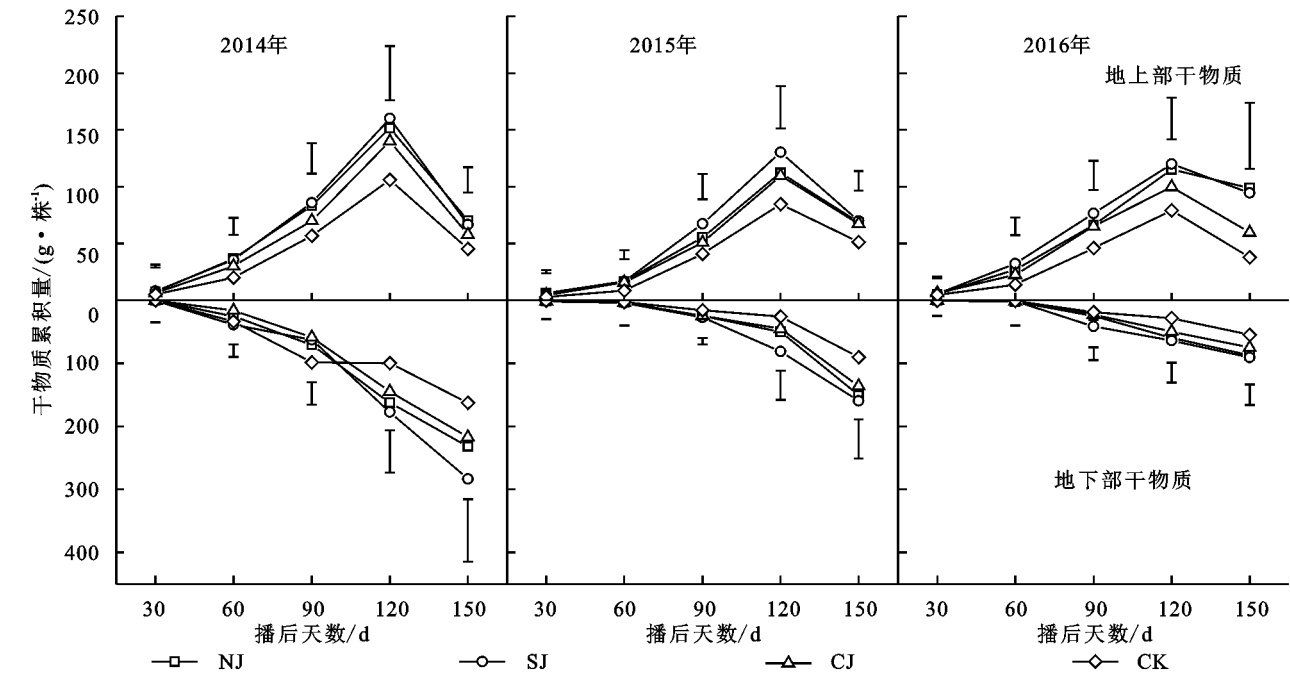


图 5 各处理下马铃薯地上/下部干物质累积动态变化

表 3 各处理对马铃薯产量和水分利用效率的影响				
年份	处理	产量/ (t·hm ⁻²)	商品 薯率/%	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
2014	NJ	40.78a	89.41b	134.05a
	SJ	38.52b	93.42a	127.30b
	CJ	36.68c	90.44b	118.90c
	CK	26.86d	82.76c	89.06d
2015	NJ	15.46c	76.79c	39.83c
	SJ	20.08a	83.91a	50.77a
	CJ	16.28b	80.61b	43.44b
	CK	14.69d	73.23d	39.21c
2016	NJ	13.90b	84.98a	50.28b
	SJ	17.19a	82.13b	55.98a
	CJ	10.97c	73.78c	41.44c
	CK	9.17d	67.35d	34.49d

2.6 耕作覆盖处理下马铃薯产量与土壤性质和水分利用特征的关系

由土壤容重、土壤有机质和土壤水分与马铃薯产量的相关分析(表 4)可知,土壤容重与土壤有机质、生育期土壤贮水量和马铃薯产量呈负相关,土壤有机质与土壤贮水量呈显著或极显著正相关,与马铃薯产量呈正相关。可见,耕作覆秸秆处理能够降低土壤容重,调控土壤水分,有利于土壤有机质含量的增加,进而促进马铃薯产量的提高。

由表 5 可知,相对欠水年生长前期(播后 0~60 天),

马铃薯产量与 0—200 cm 土层土壤贮水量呈正相关,与阶段耗水量和地下部干物质质量呈负相关,而与地上部干物质质量呈极显著正相关;生长中期(播后 60~120 天),产量与土壤贮水量和地上部干物质质量呈显著正相关,而与地下部干物质质量呈正相关;生长后期(播后 120~150 天),产量与土壤贮水量和地上部干物质质量呈极显著正相关,与阶段耗水量和地下部干物质质量呈正相关。平水年生长前期,产量与地上部干物质质量呈显著正相关,与土壤贮水量和地上部干物质质量呈正相关,而与阶段耗水量呈负相关;生长中期,产量与地上部干物质质量和地下部干物质质量呈显著正相关,与土壤贮水量和阶段耗水量呈正相关;生长后期,产量与土壤贮水量、阶段耗水量和干物质质量均呈正相关。欠水年生长前期,产量与地上部干物质质量呈显著正相关,与土壤贮水量呈正相关,而与阶段耗水量呈负相关;生长中期和生长后期,产量与地上部干物质质量和地下部干物质质量呈显著或极显著正相关,而与土壤贮水量和阶段耗水量呈正相关。可见,马铃薯生长中后期土壤水分对产量的形成起重要作用,尤其在相对欠水年表现明显。

3 讨论

3.1 不同耕作结合秸秆覆盖对土壤容重和有机质含量的影响

不同耕作结合秸秆覆盖可有效降低土壤容重,增

加土壤有机质含量。刘继龙等^[15]研究表明,免耕、深松结合秸秆覆盖显著降低土壤容重,但在传统耕作下秸秆覆盖的土壤容重均优于无覆盖。本研究结果表明,秋耕覆盖可显著降低 0—40 cm 土层土壤容重,以深松结合秸秆覆盖处理最为显著。这是由于深松可破除犁底层,能较大程度地疏松土壤,增加土壤通透性^[16],同时秸秆的腐烂使表层有机质含量增加,土壤容重降低^[17]。侯贤清等^[6]研究表明。耕作覆盖处理中,0—40 cm 土层土壤有机质含量以免耕覆秸秆处理最高,翻耕不覆盖处理最低;李友军等^[18]研究也表明,深松覆盖、免耕覆盖处理下土壤有机质含量明显高于传统耕作,尤其是对 20—60 cm 层影响最大。本

研究结果表明,不同耕作结合秸秆覆盖处理下土壤有机质含量均显著高于翻耕不覆盖,其中 0—20,20—40 cm 土层有机质含量分别以深松覆秸秆和免耕覆秸秆处理最高。这是由于深松能够提高土壤的透气性,促进微生物的活化和有机物质的分解,改善土壤肥力,增加土壤有机质含量,而秸秆中含有大量有机物质,表层覆盖后使土壤有机质含量明显提高^[6];免耕措施土壤扰动较小,增加土壤容重,阻碍作物根系向下生长,从而导致对深层土壤养分的吸收减少^[19];然而,翻耕处理破坏农田土壤结构,且地表土壤裸露,无秸秆输入,土壤渗透性增加,导致地表有机物质分解加快,使其含量较低^[20]。

表 4 土壤容重、有机质、水分和马铃薯产量之间的相关分析

指标	0—40 cm 土层 土壤有机质	0—200 cm 土层不同生育阶段土壤贮水量			马铃薯产量
		0~60 d	60~120 d	120~150 d	
0—40 cm 土层土壤容重	—0.454	—0.678	—0.706	—0.271	—0.861
0—40 cm 土层土壤有机质	—	0.949 *	0.934 *	0.976 * *	0.840

注: * 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著; * * 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著。下同。

表 5 马铃薯产量与生育期土壤水分利用特征的相关分析

年份	播后	土壤	阶段	地上部	地下部
	天数/d	贮水量	耗水量	干物质	干物质
2014	0~60	0.737	—0.162	0.975 * *	—0.244
	60~120	0.921 *	—0.143	0.949 *	0.782
	120~150	0.988 * *	0.629	0.972 * *	0.813
2015	0~60	0.621	—0.767	0.509	0.949 *
	60~120	0.403	0.843	0.882 *	0.925 *
	120~150	0.091	0.496	0.606	0.693
2016	0~60	0.803	—0.245	0.946 *	0.066
	60~120	0.807	0.193	0.929 *	0.975 * *
	120~150	0.349	0.842	0.896 *	0.909 *

3.2 不同降水年型下耕作结合秸秆覆盖对马铃薯生育期土壤贮水量的影响

关于蓄水保墒耕作覆盖技术高效利用自然降水方面,前人已进行大量研究。李娟等^[21]研究表明,不同降水年型保护性耕作体系可改善作物主要生育期土壤水分,在干旱年和平水年分别以连续免耕处理和免耕/深松处理蓄水效率较高。本研究结果表明,降水年型对马铃薯生育期 0—200 cm 土层土壤蓄墒效果影响显著,并以平水年蓄墒效果较好。相对欠水年和欠水年均以 SJ 处理马铃薯全生育期土壤贮水量最高,平水年以 NJ 处理最高。这是由于保护性耕作结合秸秆覆盖措施可改善土体结构,促进土壤对自然降水的保蓄,在降水较少的年份,深松结合秸秆覆盖可打破犁底层,增加土壤对降水的蓄纳能力,有效减少水分径流^[8,22],在降水正常的年份,免耕结合秸秆覆盖能减少对土壤的扰动,使表层土壤微孔隙和其连续的孔隙路径

得以维持,有效促进土壤稳定性渗透率和饱和导水率的提高,进而提高马铃薯田土壤的蓄墒水平^[23]。

Wang 等^[24]研究表明,与传统耕作不覆盖相比,休闲期免耕/深松轮耕结合覆盖措施能明显增加春玉米播种期 0—200 cm 土层土壤贮水量。孙敏等^[25]研究表明,休闲期耕作能有效纳雨蓄墒,使播种前和开花期土壤蓄水量增加,且枯水年、平水年以深翻效果较好,丰水年以深松效果较好。本研究发现,耕作秸秆覆盖措施可显著提高马铃薯生育期 0—200 cm 土层土壤贮水量,以深松覆秸秆在相对欠水年和欠水年生长前中期及平水年生长前期效果最佳,以免耕覆秸秆在相对欠水年和欠水年生长后期及平水年生长中后期土壤贮水量效果较好。其原因可能是保护性耕作可减少对土壤的干扰且玉米秸秆本身茎秆絮状髓部的吸水保水性与表层较厚的蜡质层有关,更有利于保水和降低蒸发,较传统翻耕不覆盖具有明显的蓄水保墒作用^[21,26]。尤其在作物前期降水较少,深松覆秸秆处理能有效蓄存休闲期降雨,增加相对欠水年和欠水年生长中期降雨入渗,进而提高土壤贮水量^[27],免耕覆秸秆能提高土壤孔隙度,增强持水能力^[15],有效防止土壤水分的蒸发,同时改善平水年生长中后期及相对欠水年和欠水年生长后期降雨对土壤的渗透,进而提高土壤贮水量^[28]。张冬梅等^[29]研究发现,秋深耕结合秸秆还田对播后苗前和苗期 0—10 cm 土壤含水量有显著的提升效果,其中春旱越重的年份秋深耕秸秆还田蓄水保墒效应越明显。本研究结果表明,深松覆秸秆处理对相对欠水年生长前期 0—60 cm 土

层和中期 120—200 cm 土层、平水年前期 20—100 cm 土层及欠水年生育期 0—80 cm 土层土壤蓄水效果最佳。这是由于深松能够加深耕层,有效疏松土壤,改善土壤的通透性,从而促进根系下扎,有利于提高对深层土壤水分的利用^[30],尤其在干旱年份蓄水增墒效果较好,秸秆覆盖能抑蒸保墒、提高降水利用率;另一方面,秸秆覆盖物能增加有机质,提高土壤团聚体的稳定性,对提高土壤的储水能力有明显效果,而两者结合能显著改善作物生育期内土壤水分条件,减少土壤水分散失,形成水分内循环,使下层水分上移,从而提高上层土壤贮水量^[31]。

3.3 不同降水年型耕作结合秸秆覆盖对马铃薯耗水特征的影响

不同降水年型耕作覆盖可改变马铃薯阶段耗水量、耗水模系数和耗水强度,调节作物耗水过程。赵亚丽等^[32]研究发现,深耕和深松秸秆还田显著增加小麦农田耗水量,显著降低休闲期的农田耗水量,且深耕秸秆还田处理的农田耗水量在降水量较多的年份高于其他处理,而与深松秸秆还田处理的农田耗水量在降水量较少的年份差异不显著;褚鹏飞等^[33]研究表明,深松后小麦总耗水量升高,并显著提高开花至成熟阶段的耗水量和耗水模系数。本研究结果表明,深松覆秸秆处理可降低相对欠水年和平水年马铃薯生长前期阶段耗水量、耗水模系数和耗水强度,提高相对欠水年和平水年生长中后期及欠水年生长后期耗水模系数和耗水强度;而免耕覆秸秆处理可降低欠水年生长前期耗水模系数和耗水强度,提高生长中期耗水模系数和耗水强度。分析原因:深松覆秸秆处理可以有效减少马铃薯生长前期裸间土壤水分蒸发,增加土壤贮水量,降低土壤水分亏缺程度,使耗水量减少,而翻耕不覆盖使地表裸露,土壤水分蒸发强烈,耗水增加^[34-35],生长中后期蒸腾作用增强,植株需水量增大,秸秆覆盖能够根据生育期降水条件调控阶段耗水量,尤其以欠水年效果较佳^[36]。

3.4 不同降水年型耕作结合秸秆覆盖对马铃薯产量与水分利用效率的影响

王红光等^[37]研究表明,在严重干旱胁迫条件下,条旋耕和深松+条旋耕处理有利于提高小麦干物质积累量;韩固等^[9]研究表明,深松覆地膜和深松覆秸秆处理可分别显著增加马铃薯地上部和地下部干物质质量,其中马铃薯干物质累积量以 2014 年最高。本研究结果发现,深松覆秸秆处理可增加马铃薯干物质质量,以在欠水年马铃薯生长中期显著增加地上部干物质质量和在平水年马铃薯生长中后期增加地下部干物

质量效果较好。其原因是深松覆秸秆处理在马铃薯生长前期表现出一定的增温效应,中后期具有明显的降温效应,同时深松可以提高土壤肥力,并能充分利用自然降水,改善耕层土壤水热环境,延缓叶片衰老,从而提升叶片光合性能,有利于马铃薯中后期生长和块茎的形成^[6,38],尤其是欠水年生长中期降水的增加(分别较相对欠水年和平水年增加 50.1,40.0 mm),使 0—80 cm 层土壤贮水量显著高于其他各处理,有利于积累该生育阶段马铃薯地上部干物质质量;在平水年马铃薯生长中后期耗水量较大,深松覆秸秆处理更能促进干物质积累向地下部转移,进而促进中后期马铃薯块茎形成,提高马铃薯干物质质量^[9]。

相关研究表明,不同降水年型对作物产量和水分利用效率的影响不同。姚宇卿等^[39]研究表明,无论何种降水年型,深松覆盖均可有效提高冬小麦产量和土壤水分利用效率,尤其在干旱年份提高的幅度更大。Tao 等^[40]研究发现,深松耕作和 50% 切碎秸秆覆盖可显著提高玉米产量和水分利用效率。本研究结果表明,相对欠水年马铃薯产量和水分利用效率以免耕覆秸秆处理效果最佳,平水年和欠水年以深松覆秸秆处理效果最佳;商品薯率在相对欠水年和平水年以深松覆秸秆处理效果最好,在欠水年以免耕覆秸秆处理效果最好。分析原因:在降水相对较少的年份,免耕覆盖处理能减少土壤水分的蒸散,促进对水分的深层利用,增强对根际土壤蓄水保墒能力,为作物生长发育和产量的形成提供了良好的环境,从而有利于提高水分利用效率和商品薯率,实现增产^[41-42];在降水分布不均,需水关键期降水较少的平水年和欠水年,深松覆秸秆处理可降低土壤容重,改善作物耗水特性,增加降雨入渗,降低株间蒸发,进而提高马铃薯水分利用效率,促进增产^[32]。

钱玉平等^[12]研究表明,马铃薯产量与播种—现蕾阶段的耗水特征呈显著或极显著负相关,与现蕾—块茎膨大、块茎膨大—成熟 2 个阶段的耗水量和耗水强度均呈极显著正相关。本研究通过相关性分析发现,耕作覆秸秆处理下土壤容重与有机质含量、土壤水分和产量均呈负相关,这是由于秸秆深还田后土壤中有机质含量得到了显著提高,能够有效改善土壤结构,降低土壤容重,这不仅提高土壤孔隙度和持水能力,而且还能改善土壤透水性,使水分沿大孔隙进入土壤,进而减少地表径流,提高水分蓄积能力,有利于块茎膨大,促进马铃薯产量的提高^[43]。另外,耕作覆盖条件下土壤水分在相对欠水年马铃薯生长中后期与产量呈显著或极显著正相关;马铃薯产量与生长前

期阶段耗水量呈负相关,与生长后期呈正相关。这是由于耕作结合秸秆覆盖措施可打破犁底层结构,增加土壤孔隙度,明显提高对降水的蓄存能力,抑制无效水分散失,增加作物生长中后期阶段耗水量,从而有利于水分的高效利用,促进马铃薯生长中后期干物质质量累积,实现马铃薯高产,在降水较少的年份效果更明显^[30]。然而,耕作覆盖措施下马铃薯增产机制还与温度和土壤结构、养分等因素有关,而本研究中尚未涉及,这有待进一步研究,且本研究仅涉及平水年和欠水年,缺少丰水年型,不能全面分析不同降雨年型对马铃薯耗水特征及产量的影响,因此有必要继续进行长期试验研究,才能准确筛选出适合宁南旱区马铃薯发展的增产机制。

4 结 论

(1)经过 3 年耕作覆盖处理后,免耕、深松结合秸秆覆盖能显著降低 0—40 cm 层土壤容重,提高 0—40 cm 层土壤有机质含量;深松或免耕覆秸秆处理可显著提高不同降水年型 0—200 cm 层土壤贮水量,降低生长前期阶段耗水量、耗水模系数和耗水强度,显著提高生长中后期阶段耗水量、耗水模系数和耗水强度,尤其在欠水年较为显著。

(2)深松覆秸秆处理能显著增加欠水年生长中期地上部干物质质量和平水年生长中后期地下部干物质质量。免耕覆秸秆对提高相对欠水年马铃薯产量和水分利用效率效果最佳,而深松覆秸秆对平水年和欠水年影响显著。通过 Pearson 相关性分析发现,耕作结合秸秆覆盖可使土壤容重降低、有机质含量增加,改善土壤保水性能,协同提高马铃薯产量。可见,免耕、深松结合秸秆覆盖能改善马铃薯生育期土壤水分状况,调控作物耗水,有利于积累更多的干物质,促进马铃薯增产,以深松覆秸秆处理效果最佳。

参考文献:

[1] 肖国举,仇正跻,张峰举,等.增温对西北半干旱区马铃薯产量和品质的影响[J].生态学报,2015,35(3):830-836.

[2] 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.

[3] 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.

[4] Thomas G A, Titmarsh G W, Freebairn D M, et al. No-tillage and conservation farming practices in grain growing areas of Queensland: A review of 40 years of development[J].Australian Journal of Experimental Agriculture,2007,47(8):887-898.

[5] Hou X Q, Li R, Jia Z K, et al. Effects of rotational tillage practices on soil properties, winter wheat yields and water-use efficiency in semi-arid areas of north-west China[J].Field Crops Research,2012,129:7-13.

[6] 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.

[7] Chen Y Z, Chai S X, Tian H H, et al. Straw strips mulch on furrows improves water use efficiency and yield of potato in a rainfed semiarid area[J].Agricultural Water Manage,2019,211:142-151.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 陈玉章,柴守玺,程宏波,等.秸秆还田结合秋覆膜对旱地冬小麦耗水特性和产量的影响[J].作物学报,2019,45(2):256-266.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 王庆杰,李洪文,何进,等.垄作免耕技术对土壤水分和玉米产量的影响[J].农业工程学报,2012,28(增刊 2):146-150.

[14] 吕文河,马子竣,李莹,等.马铃薯 4x-4x 和 4x-2x 杂种后代高世代选系总产和商品薯产量比较[J].东北农业大学学报,2014,45(10):1-9.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 潘雅文,樊军,郝明德,等.黄土塬区长期不同耕作、覆盖措施对表层土壤理化性状和玉米产量的影响[J].植物营养与肥科学报,2016,22(6):1558-1567.

[18] 李友军,黄明,吴金芝,等.不同耕作方式对豫西旱区坡耕地水肥利用与流失的影响[J].水土保持学报,2006(2):42-45,101.

[19] Zhang L, Wang J, Fu G Z, et al. Rotary tillage in rotation with plowing tillage improves soil properties and crop yield in a wheat-maize cropping system[J].PLoS One,2018,13(6):e0198193.

[20] 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.

- [21] 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.
- [22] 李荣,侯贤清.深松条件下不同地表覆盖对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2015,31(20):115-123.
- [23] 魏欢欢,王仕稳,杨文稼,等.免耕及深松耕对黄土高原地区春玉米和冬小麦产量及水分利用效率影响的整合分析[J].中国农业科学,2017,50(3):461-473.
- [24] Wang S, 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 Manage, 2018,203:376-384.
- [25] 孙敏,葛晓敏,高志强,等.不同降水年型休闲期耕作蓄水与旱地小麦籽粒蛋白质形成的关系[J].中国农业科学,2014,47(9):1692-1704.
- [26] Zribi W, Aragüés R, Medina E, et al. Efficiency of inorganic and organic mulching materials for soil evaporation control[J].Soil and Tillage Research,2015,148:40-45.
- [27] Hou X Q, Li R. Potato tuber yields in semi-arid environments are increased by tillage and mulching practices[J].Agronomy Journal,2018,110(6):2641-2651.
- [28] Huang G B, Chai Q, Feng F X, et al. Effects of different tillage systems on soil properties, root growth, grain yield, and water use efficiency of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in arid northwest China[J].Journal of Integrative Agriculture,2012,11(8):1286-1296.
- [29] 张冬梅,张伟,姜春霞,等.旱地玉米不同耕作覆盖措施的土壤环境及产量效应[J].中国农业大学学报,2019,24(6):26-37.
- [30] 薛志伟.耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特性的影响[D].郑州:河南农业大学,2014.
- [31] Dai Z J, Hu J S, Fan J, et al. No-tillage with mulching improves maize yield in dryland farming through regulating soil temperature, water and nitrate-N[J].Agriculture, Eco-systems and Environment,2021,309:e107288.
- [32] 赵亚丽,薛志伟,郭海斌,等.耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2014,47(17):3359-3371.
- [33] 褚鹏飞,于振文,王东,等.耕作方式对小麦耗水特性和籽粒产量的影响[J].中国农业科学,2010,43(19):3954-3964.
- [34] 高艳梅,孙敏,高志强,等.不同降水年型旱地小麦覆盖对产量及水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2015,48(18):3589-3599.
- [35] Cai T, Zhang C, Huang Y, et al. Effects of different straw mulch modes on soil water storage and water use efficiency of spring maize (*Zea mays* L.) in the Loess Plateau of China[J].Plant Soil Environment,2015,61(6):253-259.
- [36] 常磊,韩凡香,柴雨葳,等.秸秆带状覆盖对半干旱雨养区冬小麦耗水特征和产量的影响[J].应用生态学报,2019,30(12):4150-4158.
- [37] 王红光,于振文,张永丽,等.耕作方式对旱地小麦耗水特性和干物质积累的影响[J].作物学报,2012,38(4):675-682.
- [38] 许菁,贺贞昆,冯倩倩,等.耕作方式对冬小麦-夏玉米光合特性及周年产量形成的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):101-109.
- [39] 姚宇卿,吕军杰,张洁,等.深松覆盖对旱地冬小麦产量和水分利用率的影响[J].河南农业科学,2012,41(4):20-24.
- [40] Tao Z Q, Li C F, Li J J, et al. Tillage and straw mulching impacts on grain yield and water use efficiency of spring maize in Northern Huang-Huai-Hai Valley[J].The Crop Journal,2015,3(5):445-450.
- [41] 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.
- [42] Zhang P, Wei T, Wang H X, et al. Effects of straw mulch on soil water and winter wheat production in dryland farming[J].Scientific Reports,2015,5(1):1-12.
- [43] 王胜楠,邹洪涛,张玉龙,等.秸秆集中深还田对土壤水分特性及有机碳组分的影响[J].水土保持学报,2015,29(1):154-158.