

休闲期耕作覆盖对马铃薯苗期生理生态与产量的影响

侯贤清 李 荣 马 菲 王全旺

(宁夏大学农学院, 银川 750021)

摘要:为解决马铃薯苗期干旱的问题,针对宁夏南部旱作区季节性干旱特点,在2013—2015年秋作物收获后,通过设置不同耕作覆盖措施,分析休闲期土壤蓄水保墒效应和马铃薯苗期土壤水温变化特征,研究不同耕作覆盖措施对马铃薯苗期生长、生理指标及马铃薯产量的影响。结果表明,同一耕作方式下,地膜和秸秆覆盖处理对改善土壤水温状况、降低马铃薯叶片抗氧化酶活性、促进苗期生长和提高块茎产量均有显著影响,且耕作与覆盖交互作用存在显著差异。在两年休闲末期和马铃薯苗期,同一耕作方式下地膜和秸秆覆盖处理0~200 cm土层平均土壤蓄水量较不覆盖处理分别显著增加5.1%、7.3%和10.5%、9.2%。马铃薯苗期,同一耕作方式下地膜覆盖显著提高0~25 cm土层土壤温度1.9℃,而秸秆覆盖显著降低土壤温度3.4℃。与不覆盖处理相比,地膜和秸秆覆盖处理可获得较低的叶片抗氧化酶活性,能更有效增加苗期出苗率、株高和生物量积累,从而显著提高马铃薯块茎产量。在所有的处理组合中,深松结合秸秆覆盖处理具有较高的平均马铃薯产量和商品薯率,较传统耕作不覆盖处理分别显著提高40.0%和14.9%。因此,考虑宁夏南部旱作区气候和环境条件的可行性,深松结合秸秆覆盖措施有利于马铃薯抗旱保苗和块茎产量的提高,可在该地区应用推广。

关键词: 马铃薯;耕作覆盖;休闲期;土壤水温;苗期生长;保护酶

中图分类号: S157.4⁺2; S532 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)07-0263-11 OSID: 

Effects of Tillage with Mulching during Fallow Period on Physiological Ecology in Seedling Stage and Yield of Potato in Dry-farming Areas

HOU Xianqing LI Rong MA Fei WANG Quanwang
(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: According to the characteristics of seasonal drought happened in order to solve the potato drought resistance problem such as green shoots, seedling drought, after the autumn crop harvest in dry-farming areas of Southern Ningxia during 2013—2015, a field experiment was conducted to study the different tillage with mulching measures on soil water conservation effect during the fallow period, soil water and temperature, growth and physiological characteristic during the seedling stage of potato, and tuber yield and components. The treatments comprised three tillage systems in the main plots, i. e., no-tillage, subsoiling and plowing tillage, and three mulching methods in the subplots, i. e., plastic-film mulch, straw mulch and no mulch, which were in a replicated split plot design. The results showed that among the tillage systems, the polythene film and straw mulch significantly influenced the soil water and temperature status storage, the leaf protective enzyme activity was decreased, potato seedling growth was promoted, and tuber yield was increased. Meanwhile, the significant differences were found in the interaction of tillage and mulching. In the late terminal fallow period, among the same tillage methods, the mean soil water storages (0~200 cm) in the polythene film and straw mulch plots were significantly increased by 5.1% and 7.3%, respectively, compared with no mulching plot. The soil water storage was significantly 10.5% and 9.2% higher during potato seedling growth in the polythene film and straw mulch treatments than that of the no mulching treatment. Among the same tillage methods, the polythene film mulch significantly increased the mean topsoil (0~25 cm) temperature by 1.9℃, whereas the straw

收稿日期: 2019-10-22 修回日期: 2019-11-15
基金项目: 国家自然科学基金项目(31860362、31760370)和宁夏自然科学基金项目(2019AAC03058)
作者简介: 侯贤清(1981—),男,副教授,主要从事农业节水技术研究,E-mail: houxianqing1981@126.com
通信作者: 李荣(1984—),女,副教授,主要从事农业节水技术研究,E-mail: lirong_mail@126.com

mulch significantly reduced the soil temperature by 3.4℃ during emergence. Meanwhile, the film and straw mulch were more effective at increasing the emergence, plant height and biomass accumulation at potato seedling stage, compared with NM. Among all the treatment combinations, the highest mean potato tuber yields and commodity rates were obtained under the case of subsoiling in combination with straw mulch, which were significantly higher by 40.0% and 14.9% than that of conventional tillage in combination with no mulch. Therefore, in consideration of climatic and environmental feasibility, the subsoiling combined with straw mulch was a more favorable farming practice for drought resistance in seedlings and for increasing potato production, and it had a great potential to be adopted in the dry-farming areas of southern Ningxia.

Key words: potato; tillage with mulching; fallow period; soil water and temperature; seedling growth; protective enzymes

0 引言

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”)农民抗旱增收的主粮作物,也是近年来发展的主要经济作物和特色产业^[1],年种植面积仅次于玉米、小麦和小杂粮。马铃薯也是一种分布广泛、容易栽培的宜粮、宜饲、宜作多种工业原料的作物,在保障粮食安全、帮助农民脱贫致富和促进地方经济发展等方面发挥着十分重要的作用^[2]。然而,水资源短缺、降水时空分布不均严重限制了宁南旱区马铃薯产业的可持续发展^[3]。该区春播马铃薯一年一季,但传统耕作方式在休闲期不能有效保蓄土壤水分,导致作物产量低而不稳^[4]。因此,必须采取有效的蓄水保墒措施,以改善马铃薯生长期的土壤水分供应,从而增加作物产量。

保护性耕作结合覆盖土壤管理措施可保持土壤水分、调节耕层土壤水热状况、提高作物产量^[5-6]。免耕和深松是保护性耕作的关键部分,可通过增加降雨入渗和减少土壤蒸发来保持更多的土壤水分,从而满足作物生长的需要^[7-8]。农田覆盖具有改善土壤结构、蓄水保墒、调节地温、抑制杂草和提高产量等作用,已在旱地农业生产中得到广泛应用^[9-10]。耕作结合覆盖措施在改善土壤水热环境方面的优势已被许多研究证明。刘爽等^[11]研究表明,休闲期不同耕作方式对冬小麦播种前底墒影响显著,与传统耕作相比,免耕覆盖和深松覆盖均可显著增加土壤水分,具有良好的保墒作用。武淑娜等^[12]认为,传统耕作结合地膜覆盖在作物前期增温保墒、后期降温抑蒸,有利于改善土壤水热环境,符合大豆生长发育对环境的需求。因此,将耕作方式与覆盖措施相结合,对改善土壤水热环境及促进作物生长有着积极的作用^[10]。在研究旱作农业区,耕作方式结合覆盖措施对土壤环境与作物生长影响的同时,还必须考虑二者的交互效应,确定最有效的

耕作覆盖措施,以适应旱作区作物生育期多变的气候和环境条件^[13]。

宁夏南部旱作区干旱频发,尤其是春季干旱、水分不足和低温等问题对马铃薯生长和块茎产量影响较大^[14]。受到水温胁迫时,植物体内会形成清除活性氧系统,其中过氧化氢酶、过氧化物酶和丙二醛是重要的抗氧化酶,可清除植物体内产生的活性氧^[15-16]。马铃薯在苗期常受到春季干旱或低温胁迫的影响,破坏了植物体内活性氧的清除和生产平衡^[17],严重影响了马铃薯的出苗及生长发育。目前,休闲期耕作覆盖及其交互作用对旱作马铃薯苗期生理生态及块茎产量影响的研究,特别是马铃薯块茎产量形成与幼苗抗旱性之间关系的研究鲜见报道。研究耕作覆盖措施下休闲期土壤水分保蓄、苗期土壤水温调控和马铃薯生理生态特征,有助于解释耕作覆盖下马铃薯苗期抗旱性与增产的机理。本研究于2013—2015年在宁南旱区秋作收获后,采用3种耕作方式(免耕、深松及翻耕)、结合3种覆盖措施(地膜、秸秆及不覆盖),分析耕作覆盖措施下休闲期和马铃薯苗期土壤水温变化、抗旱成苗生理生态特征及对马铃薯产量形成的影响,以减轻春旱对马铃薯适时播种的威胁,为实现抗旱节水、马铃薯增产增收提供理论借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2013年9月—2015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实施,研究区位于宁夏南部旱作区(106°48'E,35°51'N),海拔1 800 m,多年平均降水量430.5 mm,60%降水发生在7—9月。年平均气温8.1℃,无霜期155 d,属于典型的温带半干旱大陆性气候。2013—2014年和2014—2015年降水总量分别为396.3、463.2 mm,其中休闲期(当年10月—次年4月)降水量分别为112.9、131.5 mm,马铃薯生育期(4—9月)降水量分

别为 283.4、331.7 mm。根据当地多年平均降水量(430.5 mm)及春播作物生育期降水量(337.8 mm)可知,2013—2014 年为枯水年,比多年平均降水量低 16.1%;2014—2015 年为平水年,与多年平均降水量持平。试验田为旱塬地,土壤质地为黄绵土,0~200 cm 层平均土壤容重为 1.35 g/cm³,播种前 0~40 cm 层土壤有机质质量比为 7.5 g/kg,速效氮、磷、钾质量比分别为 58.6、8.4、150.0 mg/kg,属于低等肥力水平。

1.2 试验设计

试验采用双因素裂区设计,设耕作方式和覆盖措施两个因子,主处理为耕作方式,分别为免耕(NT)、深松(ST)、翻耕(CT)3 种耕作方式;副处理为覆盖措施,分别为塑料地膜(PM)、玉米秸秆(SM)、不覆盖(NM)3 种覆盖措施,以不同耕作方式和不同覆盖措施设置交叉处理,共 9 个处理,3 次重复,27 个小区,每个小区面积 36 m²(4 m×9 m),随机区组排列。

2013 年 10 月初,秋作收获后清除残茬及杂草进行耕作处理,然后结合覆盖措施。免耕处理:秋作收获后进行表土处理,结合覆盖措施进行休闲,次年 4 月底穴播马铃薯,依次重复 2 年。深松处理:秋作收获后采用可调冀铲式深松机,进行间隔深松,耕作深度 30~35 cm,间隔 40 cm,然后结合覆盖措施进行休闲,次年 4 月底穴播马铃薯,依次重复 2 年。翻耕处理:秋作收获后采用铧式犁拖拉机耕翻,耕作深度 15~20 cm,耕后耙、耱各 1 次,然后结合覆盖措施进行休闲,次年 4 月底穴播马铃薯,依次重复 2 年。

试验地前茬作物为春玉米,处理前一直采用传统翻耕。马铃薯品种为陇薯 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,全薯作种,穴播后覆土 5 cm,种植密度 5 万株/hm²。玉米秸秆覆盖采用全生育期整秆覆盖,覆盖量 9 000 kg/hm²,覆盖厚度 5~8 cm;地膜为聚乙烯薄膜(宽 0.8 m、厚 0.008 mm)。试验期间无灌溉,苗期和现蕾期中耕培土 2 次,施肥方式结合秋耕实行秋施肥,施腐熟农家肥(牛粪) 30 t/hm²,尿素 150 kg/hm²,磷酸二铵 150 kg/hm²,硫酸钾 150 kg/hm²,试验期间人工除草。马铃薯分别于 2014 年 4 月 28 日、2015 年 5 月 2 日播种;于 2014 年 10 月 3 日、2015 年 9 月 23 日收获。

1.3 指标测定

1.3.1 土壤含水率

在 2013 年 10 月初试验处理前、2014 年马铃薯播种、苗期、收获期和 2015 年播种期、苗期,采用土

钻取土干燥法测定 0~200 cm 层土壤质量含水率,每 20 cm 为一层,3 次重复。每处理小区选择中间行马铃薯植株附近 10 cm 区域进行测定。

土壤蓄水量计算公式为

$$W = 10h\gamma a \tag{1}$$

式中 W——土壤蓄水量,mm
h——土层深度,cm
γ——土壤容重,g/cm³
a——土壤质量含水率,%

休闲期土壤蓄水效率计算公式为

$$W_{SE} = \Delta W / P \times 100\% \tag{2}$$

式中 W_{SE}——休闲期土壤蓄水效率, %
ΔW——休闲期前、后 0~200 cm 层土壤增加的蓄水量,mm
P——休闲期降水量,mm

1.3.2 土壤温度

在马铃薯苗期,选择晴天采用曲管温度计测定 08:00—20:00 土壤 5、10、15、20、25 cm 温度,每 2 h 记录 1 次;连续 3 d 并取其平均值作为苗期地温。

1.3.3 马铃薯苗期生长及生理指标

在马铃薯苗期,统计各处理区最终出苗率(直至出苗完全为止,出苗率为出苗数与种薯数比值)。同时各处理区随机选取 5 株,测定与作物生长状况密切相关的株高、地上部生物量等指标;株高采用生理株高衡量,为地上茎基部到生长点的距离;植株地上部生物量包括地上部茎、叶的总和,在 105℃ 杀青 30 min,80℃ 干燥至质量恒定。

在马铃薯苗期,分别测定叶片过氧化氢酶(CAT)活性、过氧化物酶(POD)活性、丙二醛(MDA)含量。采用高锰酸钾滴定法测定 CAT 活性,愈创木酚法测定叶片 POD 活性,硫代巴比妥酸(TBA)法测定叶片丙二醛(MDA)含量。CAT 活性用 U/(g·min)表示;POD 活性测定,以每分钟 Unit 变化 0.1 为一个活性单位,用 U/(g·min)表示。

1.3.4 马铃薯产量及构成因素

马铃薯收获时,分小区进行测产,并根据马铃薯商品薯分级标准,分别记录大(单薯质量大于 150 g)、中(单薯质量 75~150 g)、小薯(单薯质量小于 75 g)个数及质量,折算产量,并计算商品薯率,计算公式为

$$S = Y / Y_{total} \times 100\% \tag{3}$$

式中 S——商品薯率, %
Y——单薯 75 g 以上的产量,kg/hm²
Y_{total}——马铃薯总产量,kg/hm²

同时各处理连续取植株 10 株,测定单株薯数、单薯质量及单株产量。

1.4 数据处理

数据采用 SPSS 18.0 软件进行裂区设计的方差分析,最小显著差异法 (LSD) 进行多重比较,Excel 2003 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同耕作覆盖对休闲期土壤蓄水保墒作用的影响

如表 1 所示,在不同耕作方式下,两年休闲末期各处理土壤蓄水量均随降水量的增加而有不同程度的增加,与 NM 处理相比,PM、SM 处理分别显著增加平均土壤蓄水量 5.1% 和 7.3%;同一覆盖措施下,与 CT 处理相比,NT、ST 处理能增加土壤蓄水量,但差异不显著。在所有处理组合中,2013—2014 年 ST×PM 处理下土壤蓄水量最高,NT×PM 和 CT×PM 处理次之,分别较 CT×NM 处理显著提高 9.3%、7.6% 和 7.6%。2014—2015 年 ST×SM 和 NT×SM 处理下土壤蓄水效果最佳,CT×SM 处理次之,分别较 CT×NM 处理显著提高 11.2%、11.4% 和 9.0%。在 2013—2014 年试验处理前(2013 年 10 月 3 日),由于无耕作和覆盖措施,各处理 0~200 cm 层基础土壤蓄水量相同(450.4 mm)。2013—2014 年休闲末期,耕作方式、耕作和覆盖交互作用对土壤水分的影响不显著,而同一耕作方式下不同覆盖措施对土壤蓄水量影响极显著,PM、SM 处理土壤蓄水量较 NM 处理显著增加 7.8% 和 5.8%。2014—

2015 年,在休闲初期耕作与覆盖交互作用显著影响土壤蓄水量,覆盖措施极显著影响土壤蓄水量,而耕作方式影响不显著;休闲末期,耕作方式、覆盖措施及其二者交互作用均对土壤蓄水量影响显著。

随着降水量的增加,不同耕作覆盖措施下土壤蓄水效率存在差异(表 1)。2013—2014 年各处理土壤蓄水效率与土壤蓄水量相似,耕作方式、耕作和覆盖交互作用对土壤蓄水效率的影响均不显著,而不同覆盖措施对土壤蓄水效率影响极显著,PM、SM 处理土壤蓄水效率均较 NM 处理显著增加。2014—2015 年耕作方式、覆盖措施及耕作和覆盖交互作用对土壤蓄水效率的影响均与对休闲初期土壤蓄水量的影响一致。在同一覆盖措施下 ST、NT 处理土壤蓄水效率显著高于 CT 处理,而 ST、NT 处理间无显著差异。在同一耕作方式下 PM、SM 处理土壤蓄水效率显著高于 NM 处理,而 PM、SM 处理间无显著差异。与 NM 处理相比,PM、SM 处理平均土壤蓄水效率分别显著增加 75.4% 和 78.0%。在所有处理组合中,ST×PM 处理两年平均土壤蓄水效率最高(52.33%),NT×SM 处理(51.51%)和 ST×SM 处理(51.42%)次之,而 CT×NM 处理最低(27.66%)。可见,耕作方式结合覆盖措施可更好接纳冬春降水,蓄存于深层土壤,供春播作物生长需要,以深松结合地膜覆盖处理土壤蓄水保墒效果最佳。

表 1 耕作覆盖对休闲期 0~200 cm 土壤蓄水效应的影响

Tab.1 Effects of tillage with mulching practices on soil water storage at 0~200 cm layer during fallow period							
耕作 方式	覆盖 措施	2013—2014 年			2014—2015 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/%
		初期	末期		初期	末期	
NT	PM	450.40	(512.40±5.20) ^a	(54.92±0.55) ^a	(465.2±2.99) ^b	(523.98±3.31) ^b	(44.69±1.06) ^a
	SM		(506.08±5.98) ^a	(49.32±0.46) ^a	(485.98±6.06) ^a	(556.59±4.84) ^a	(53.70±0.72) ^a
	NM		(476.00±4.48) ^b	(22.67±0.82) ^b	(471.48±3.62) ^{ab}	(516.56±5.53) ^b	(34.28±1.63) ^c
	平均		(498.16±4.79) ^A	(42.30±1.91) ^B	(474.23±4.40) ^A	(530.71±2.36) ^A	(42.96±5.07) ^A
ST	PM	450.40	(520.35±7.92) ^a	(61.96±1.70) ^a	(467.92±4.62) ^b	(524.07±6.39) ^b	(42.69±1.50) ^a
	SM		(504.40±4.24) ^b	(47.83±0.76) ^b	(485.24±2.78) ^a	(557.57±2.47) ^a	(55.01±0.84) ^a
	NM		(481.40±6.14) ^c	(27.46±0.81) ^c	(469.14±2.15) ^b	(510.26±3.70) ^c	(31.27±1.26) ^b
	平均		(502.05±1.25) ^A	(45.75±1.44) ^A	(474.10±1.11) ^A	(530.63±2.79) ^A	(42.99±2.12) ^A
CT	PM	450.40	(512.32±4.68) ^a	(54.84±0.24) ^a	(464.68±3.08) ^b	(518.07±4.74) ^b	(40.85±0.85) ^a
	SM		(506.57±2.48) ^a	(49.75±1.53) ^a	(481.48±3.25) ^a	(545.94±4.82) ^a	(48.77±1.14) ^a
	NM		(476.20±2.04) ^b	(22.85±0.92) ^b	(457.96±6.39) ^b	(500.64±5.17) ^c	(32.46±1.59) ^b
	平均		(498.36±2.50) ^A	(42.48±0.79) ^B	(468.04±5.56) ^A	(519.88±2.93) ^B	(39.35±5.60) ^B
F	耕作		1.54	1.54	1.45	10.76 [*]	2.33
	覆盖		286.43 ^{**}	286.43 ^{**}	134.59 ^{**}	700.27 ^{**}	678.99 ^{**}
	耕作×覆盖		2.26	2.26	4.81 [*]	3.28 [*]	3.34 [*]

注:不同大、小写字母分别表示同类处理间差异达到极显著($P<0.01$)和显著水平($P<0.05$)。*、**分别表示 F 值达显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)水平。下同。

2.2 不同耕作覆盖对苗期土壤蓄水量和温度的影响

耕作覆盖措施可调控马铃薯苗期土壤水温状况。如图 1a、1b (图中不同小写字母表示同类处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)). * 和 ** 分别表示 F 值达显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$) 水平)所示,2015 年马铃薯苗期各处理 0 ~ 200 cm 层土壤蓄水量均高于 2014 年,这是由于 2015 年作物苗期降雨量高于 2014 年(2014 年为 27.4 mm,2015 年为 72.7 mm)。两年同一耕作方式下不同覆盖措施土壤蓄水量均存在极显著差异,而同一覆盖措施下不同耕作方式对土壤蓄水量影响显著。无论何种耕作方式,PM、SM 处理较 NM 处理平均土壤蓄水量分别显著提高 10.5%、9.2%。在同一覆盖措施下,ST 处理土壤蓄水量最高,其次为 NT、CT 处理,但处理间差异不显著。在 2 年马铃薯苗期,耕作与覆盖交互作用对苗期土壤蓄水量影响显著,NT×SM 处理在所有处理组合中土壤蓄水量最高(481.7 mm),而 CT×NM 处理土壤蓄水量最低(425.8 mm),

NT×SM 处理平均土壤蓄水量较 CT×NM 处理显著提高 13.1%。

2014 年各耕作覆盖处理表层(0 ~ 25 cm)土壤温度均显著高于 2015 年(图 1c、1d),这与 2014 年马铃薯生育期气温均高于 2015 年有关。同一覆盖措施下不同耕作方式对表层土壤温度影响不显著,而同一耕作方式下不同覆盖措施对表层土壤温度的影响显著。不同覆盖措施中,两年平均表层土壤温度以 PM 处理最高(25.0℃),SM 处理最低(19.7℃)。与 NM 处理(23.1℃)相比,PM 处理表层土壤温度显著增加 1.9℃,而 SM 处理使表层土壤温度显著降低 3.4℃。不同耕作方式中,ST 处理平均表层土壤温度较高(23.0℃),CT 处理(22.6℃)和 NT(22.3℃)次之。在所有的处理组合中,NT×PM 处理获得最高的平均表层土壤温度(25.8℃),而 NT×SM 处理(19.3℃)表层土壤温度最低。与 CT×NM 处理相比,NT×PM 处理平均表层土壤温度显著增加 2.7℃,而 NT×SM 处理显著降低 3.8℃。

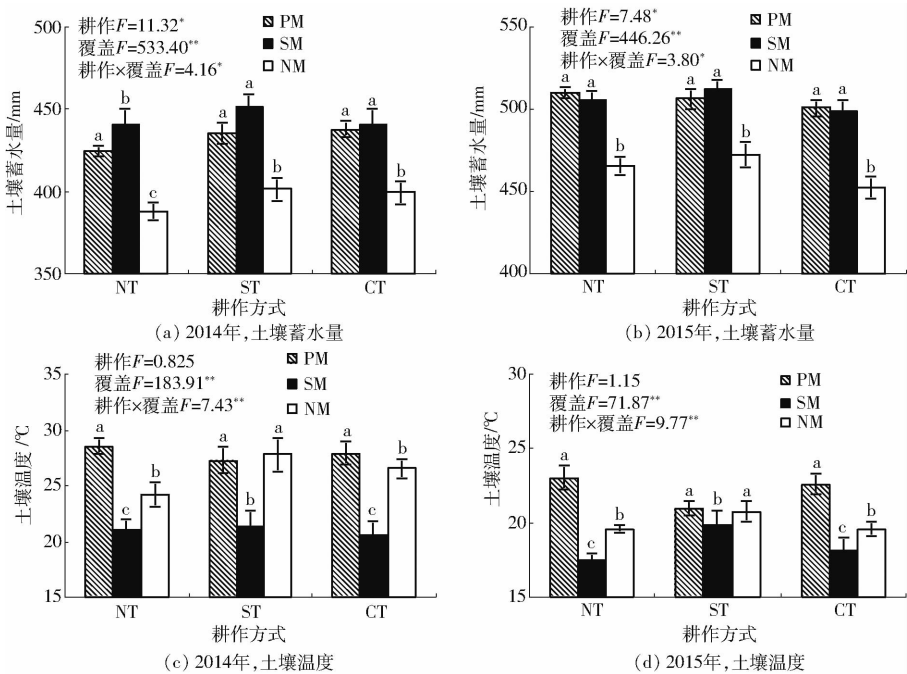


图 1 耕作覆盖对马铃薯苗期土壤蓄水量和温度的影响

Fig. 1 Effects of tillage with mulching practices on soil water and temperature

2.3 不同耕作覆盖措施下马铃薯苗期的生理生态特征

过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和丙二醛(MDA)是植物体内清除活性氧的重要抗氧化酶。由表 2 可知,2014 年不同耕作覆盖处理下马铃薯苗期叶片 CAT、POD 活性以及 MDA 含量均高于 2015 年,这可能由于 2014 年马铃薯苗期降水量高于 2015 年。耕作方式、覆盖措施以及二者交互作用对叶片抗氧化

酶活性均有显著影响。同一耕作方式下,与 NM 处理相比,PM、SM 处理平均 CAT 活性 2014 年分别显著下降 7.0% 和 11.6%,2015 年分别显著下降 16.5% 和 18.4%。两年在同一覆盖措施下,ST 处理平均 CAT 活性显著低于 CT 处理 14.9%,而 NT 处理与 CT 处理间无显著差异。在所有的处理组合中,ST×SM 处理平均 CAT 活性最低,而 CT×NM 处理最高,ST×SM 处理平均 CAT 活性较 CT×NM 处理显著降低

29.3%。2014 年不同耕作方式下叶片 POD 活性由大到小依次为 CT、ST、NT,不同覆盖措施下叶片 POD 活性由大到小依次为 NM、PM、SM;而 2015 年各处理 POD 活性由大到小表现为 CT、NT、ST 和 NM、PM、SM。在所有的处理组合中,两年 POD 活性均以 CT×NM 处理平均值最大,ST×SM 处理较 CT×NM 处理 POD 活性平均值显著降低 38.7%。耕作方式、覆盖措施以及二者交互作用对 MDA 含量也有显著影响。

在不同耕作方式下,NM 处理两年平均 MDA 含量最大,其次是 PM 处理,SM 处理最小,SM、PM 处理较 NM 处理平均 MDA 含量分别显著降低 18.4% 和 8.6%。无论何种覆盖措施,2014 年 MDA 含量由大到小依次为 CT、ST、NT,2015 年为 CT、NT、ST。ST×SM 处理两年平均 MDA 含量最低,而 CT×NM 处理最高,ST×SM 处理平均 MDA 含量较 CT×NM 处理显著降低 25.0%。

表 2 不同耕作覆盖模式下马铃薯苗期生理生态特征
Tab.2 Physiological ecology characteristics of tillage with mulching patterns at potato seedling period

年份	耕作方式	覆盖措施	CAT 活性/ (U·(g·min) ⁻¹)	POD 活性/ (U·(g·min) ⁻¹)	MDA 含量/ (μmol·g ⁻¹)	出苗率/ %	株高/cm	生物量/ (g·株 ⁻¹)
2014	NT	PM	(674.55±0.98) ^b	(76.78±1.45) ^b	(9.54±0.07) ^b	(80.07±2.15) ^b	(18.34±0.25) ^a	(7.55±0.13) ^a
		SM	(620.82±2.59) ^c	(68.37±1.90) ^c	(7.69±0.16) ^c	(87.13±1.51) ^a	(18.69±0.50) ^a	(7.27±0.09) ^a
		NM	(692.18±1.84) ^a	(80.38±1.12) ^a	(10.38±0.13) ^a	(74.93±1.21) ^c	(15.19±0.40) ^b	(5.09±0.04) ^b
		平均	(662.52±2.53) ^A	(75.17±4.30) ^B	(9.20±0.28) ^B	(80.71±1.62) ^A	(17.41±0.38) ^A	(6.64±0.08) ^B
	ST	PM	(599.19±0.86) ^b	(82.97±2.76) ^a	(9.54±0.07) ^b	(84.11±1.54) ^a	(16.07±0.50) ^b	(8.45±0.09) ^a
		SM	(558.44±1.93) ^c	(65.26±1.48) ^b	(8.26±0.07) ^c	(84.37±1.68) ^a	(17.88±0.31) ^a	(7.84±0.08) ^b
		NM	(659.49±3.14) ^a	(83.28±0.77) ^a	(11.28±0.19) ^a	(72.57±2.17) ^b	(13.68±0.45) ^c	(5.69±0.10) ^c
		平均	(605.71±4.37) ^B	(77.17±1.87) ^B	(9.69±0.38) ^{AB}	(80.35±1.80) ^A	(15.88±0.42) ^B	(7.33±0.09) ^A
	CT	PM	(644.42±1.76) ^b	(81.84±1.61) ^b	(10.43±0.18) ^b	(79.40±2.85) ^b	(16.60±0.46) ^a	(7.56±0.12) ^a
		SM	(645.12±2.47) ^b	(73.22±2.35) ^c	(8.99±0.13) ^c	(84.50±1.87) ^a	(14.38±0.40) ^b	(6.24±0.20) ^b
		NM	(711.62±0.94) ^a	(86.40±2.53) ^a	(11.40±0.23) ^a	(70.20±2.04) ^c	(13.00±0.60) ^c	(5.16±0.65) ^c
		平均	(667.06±5.41) ^A	(80.48±2.99) ^A	(10.27±0.36) ^A	(78.03±2.25) ^A	(14.66±0.49) ^C	(6.32±0.32) ^C
	F	耕作	12.24 [*]	16.01 ^{**}	10.16 [*]	2.99	110.35 ^{**}	183.34 ^{**}
		覆盖	439.57 ^{**}	110.77 ^{**}	424.30 ^{**}	139.53 ^{**}	116.27 ^{**}	245.13 ^{**}
		耕作×覆盖	406.12 ^{**}	6.98 ^{**}	17.22 ^{**}	4.49 [*]	14.16 ^{**}	5.70 ^{**}
2015	NT	PM	(555.53±1.14) ^b	(49.35±1.02) ^b	(8.63±0.18) ^b	(99.13±1.58) ^a	(14.66±0.45) ^a	(5.97±0.16) ^b
		SM	(556.41±1.88) ^b	(48.72±1.86) ^b	(8.38±0.52) ^b	(95.33±0.95) ^b	(13.13±0.61) ^b	(6.37±0.06) ^a
		NM	(693.92±2.52) ^a	(54.43±1.74) ^a	(9.43±0.18) ^a	(84.40±1.95) ^c	(12.12±0.35) ^c	(3.85±0.18) ^c
		平均	(601.95±3.35) ^B	(50.83±4.84) ^A	(8.81±0.31) ^{AB}	(92.95±1.49) ^B	(13.30±0.47) ^A	(5.40±0.14) ^A
	ST	PM	(530.40±1.74) ^b	(35.60±0.93) ^b	(7.99±0.14) ^b	(100±2.06) ^a	(13.31±0.20) ^a	(5.68±0.08) ^a
		SM	(489.06±4.06) ^c	(27.52±3.05) ^c	(7.28±0.15) ^c	(95.53±0.90) ^b	(13.19±0.40) ^a	(5.00±0.13) ^b
		NM	(579.19±2.47) ^a	(51.72±1.70) ^a	(8.75±0.10) ^a	(88.57±1.82) ^c	(12.13±0.42) ^b	(3.55±0.07) ^c
		平均	(532.88±0.98) ^C	(38.28±4.44) ^B	(8.01±0.16) ^B	(94.70±1.59) ^A	(12.88±0.34) ^B	(4.74±0.09) ^B
	CT	PM	(620.09±1.68) ^b	(47.08±2.42) ^b	(9.25±0.07) ^a	(94.50±2.10) ^a	(14.28±0.50) ^a	(3.85±0.09) ^b
		SM	(621.40±1.03) ^b	(41.64±1.67) ^c	(8.82±0.07) ^b	(90.57±1.91) ^b	(13.50±0.30) ^b	(4.45±0.07) ^a
		NM	(770.59±1.91) ^a	(64.91±1.53) ^a	(9.33±0.07) ^a	(83.63±1.12) ^c	(12.21±0.56) ^c	(2.89±0.13) ^c
		平均	(670.69±1.62) ^A	(51.21±0.83) ^A	(9.13±0.06) ^A	(89.57±1.71) ^C	(13.33±0.45) ^A	(3.73±0.09) ^C
	F	耕作	89.08 ^{**}	35.10 ^{**}	62.44 ^{**}	44.04 ^{**}	15.16 [*]	75.82 ^{**}
		覆盖	218.00 ^{**}	62.92 ^{**}	10.48 ^{**}	258.38 ^{**}	92.67 ^{**}	392.81 ^{**}
		耕作×覆盖	38.79 ^{**}	10.89 ^{**}	12.13 ^{**}	3.47 [*]	5.64 ^{**}	24.87 ^{**}

提高马铃薯出苗率及促进苗期生长对其营养生长和块茎产量的形成至关重要。在 2015 年马铃薯幼苗生长期,各处理土壤水分和温度条件较好,马铃薯出苗率均高于 2014 年(表 2)。2014 年,不同耕作方式对作物出苗率影响不显著,而覆盖措施、耕作与覆盖交互作用对作物出苗率存在显著差异。2015 年,耕作方式、覆盖措施及其二者交互作用对马铃薯

出苗率有显著影响。在两年的研究中,在同一耕作方式下 PM、SM 处理平均马铃薯出苗率均显著高于 NM 处理 13.3% 和 13.2%。在所有的处理组合中,两年马铃薯平均出苗率以 ST×PM 处理最高(92.2%),NT×SM 处理次之(91.2%),而 CT×NM 处理最低(76.9%),ST×PM、NT×SM 处理较 CT×NM 处理平均马铃薯出苗率分别显著提高 19.9% 和

18.6%。耕作覆盖措施可调节马铃薯苗期土壤水分和温度微环境,从而显著促进马铃薯前期生长发育。在两年的研究中,覆盖措施、耕作与覆盖交互作用对马铃薯苗期株高和生物量(表 2)均存在极显著影响。2014 年耕作方式可极显著影响马铃薯苗期株高,而 2015 年不同耕作方式对马铃薯苗期株高的影响呈显著水平。两年在所有处理组合中,CT×NM 处理下马铃薯平均株高最低,而 ST×PM、NT×PM 处理对作物生长的促进作用最佳。两年耕作方式、覆盖措施及其二者交互作用对马铃薯苗期生物量的影响均呈极显著水平。同一耕作方式下不同覆盖措施马铃薯苗期平均生物量由大到小依次为 SM、PM、NM,PM、SM 处理较 NM 处理平均马铃薯生物量分别显著提高 41.8% 和 49.0%;同一覆盖措施下不同耕作方式平均马铃薯生物量 NT 处理和 ST 处理相近,较 CT 处理分别显著提高 19.8% 和 20.1%。在

所有的处理组合中,平均马铃薯生物量以 ST×PM 处理最高,CT×NM 处理最低,这是由于 ST×PM 处理的马铃薯出苗率最高,对作物苗期干物质累积起促进作用。然而,CT×NM 处理马铃薯出苗率较低,在苗期表现出较低的生物量。

2.4 不同耕作覆盖对旱作马铃薯产量及其构成因素的影响

由表 3 可知,耕作方式、覆盖措施及其二者交互作用均可显著改善旱作马铃薯的产量构成(单株结薯数、单薯质量和单株产量),显著提高马铃薯产量。无论何种覆盖措施,2014 年不同耕作方式对马铃薯单株结薯数、单薯质量和单株产量的影响显著,而 2015 年同一覆盖措施下不同耕作方式对马铃薯产量构成影响极显著。不同耕作方式下平均单株结薯数由大到小依次为 NT、ST、CT,不同覆盖措施下平均单薯质量、单株产量由高到低依次为 ST、NT、

表 3 不同耕作覆盖措施下旱作马铃薯产量及其构成因素

Tab. 3 Yield and yield components of potato under different tillage with mulching practices							
年份	耕作方式	覆盖措施	单株结薯数/ (个·株 ⁻¹)	单薯质量/ g	单株产量/ (kg·株 ⁻¹)	产量/ (kg·hm ⁻²)	商品薯率/ %
2014	NT	PM	(6.7±0.2) ^b	(89±5) ^a	(0.60±0.01) ^b	(29752.4±834.2) ^b	(91.09±0.80) ^a
		SM	(8.9±0.1) ^a	(92±1) ^a	(0.82±0.01) ^a	(40781.0±1029.0) ^a	(89.41±0.82) ^b
		NM	(5.6±0.1) ^c	(92±4) ^a	(0.51±0.01) ^c	(25697.8±616.5) ^c	(85.69±1.30) ^c
		平均	(7.1±0.1) ^A	(91±3) ^B	(0.65±0.01) ^A	(32077.1±823.3) ^{AB}	(88.73±0.11) ^B
	ST	PM	(7.4±0.2) ^a	(87±7) ^b	(0.65±0.02) ^b	(32276.0±1803.6) ^b	(89.10±1.06) ^c
		SM	(6.3±0.1) ^c	(123±7) ^a	(0.77±0.02) ^a	(38515.0±1647.1) ^a	(93.42±1.05) ^a
		NM	(6.7±0.1) ^c	(80±2) ^c	(0.54±0.01) ^c	(26899.8±1205.7) ^c	(90.63±0.38) ^b
		平均	(6.8±0.3) ^A	(97±4) ^{AB}	(0.66±0.01) ^A	(32563.6±749.8) ^A	(91.05±0.82) ^A
	CT	PM	(5.1±0.1) ^c	(115±1) ^a	(0.59±0.01) ^b	(29333.3±802.9) ^b	(92.22±0.73) ^a
		SM	(6.9±0.2) ^a	(106±1) ^b	(0.73±0.01) ^a	(36679.6±1050.5) ^a	(90.44±0.90) ^b
		NM	(6.6±0.1) ^b	(82±3) ^c	(0.54±0.01) ^c	(26864.7±804.3) ^c	(82.76±1.28) ^c
		平均	(6.2±0.1) ^B	(101±1) ^A	(0.62±0.00) ^B	(30959.2±380.9) ^B	(88.47±0.86) ^B
	F	耕作	11.84 [*]	9.48 [*]	6.68 [*]	4.83	33.19 ^{**}
		覆盖	39.55 ^{**}	92.33 ^{**}	727.66 ^{**}	266.92 ^{**}	95.42 ^{**}
		耕作×覆盖	57.55 ^{**}	55.73 ^{**}	17.95 ^{**}	6.00 ^{**}	37.51 ^{**}
2015	NT	PM	(5.8±0.2) ^b	(54±1) ^a	(0.31±0.00) ^a	(15686.2±95.7) ^a	(79.77±1.22) ^a
		SM	(6.2±0.0) ^a	(50±1) ^b	(0.31±0.00) ^a	(15464.7±117.2) ^a	(76.79±0.36) ^b
		NM	(5.7±0.1) ^b	(47±1) ^c	(0.27±0.00) ^b	(13550.9±59.9) ^b	(70.17±1.94) ^c
		平均	(5.9±0.0) ^A	(50±1) ^C	(0.30±0.02) ^C	(14900.6±232.1) ^C	(75.58±1.16) ^B
	ST	PM	(5.2±0.0) ^b	(68±1) ^a	(0.35±0.00) ^b	(17746.9±207.2) ^b	(85.82±0.62) ^a
		SM	(6.5±0.1) ^a	(62±1) ^b	(0.40±0.00) ^a	(20076.6±86.8) ^a	(83.91±1.17) ^a
		NM	(5.0±0.0) ^c	(63±1) ^b	(0.32±0.00) ^c	(15773.2±262.8) ^c	(70.02±1.43) ^b
		平均	(5.6±0.0) ^B	(64±1) ^A	(0.36±0.03) ^A	(17865.6±1080.7) ^A	(79.92±0.67) ^A
	CT	PM	(5.5±0.3) ^b	(62±3) ^b	(0.34±0.00) ^a	(16981.1±86.8) ^a	(75.21±2.04) ^b
		SM	(5.0±0.0) ^c	(65±0) ^a	(0.33±0.00) ^b	(16278.6±250.1) ^b	(80.61±1.96) ^a
		NM	(6.2±0.0) ^a	(47±1) ^c	(0.29±0.00) ^c	(14690.4±304.3) ^c	(73.23±1.07) ^c
		平均	(5.6±0.0) ^B	(58±2) ^B	(0.32±0.03) ^B	(15967.3±922.7) ^B	(76.35±0.38) ^B
	F	耕作	35.54 ^{**}	42.96 ^{**}	59.95 ^{**}	33.21 ^{**}	19.33 ^{**}
		覆盖	19.00 ^{**}	171.26 ^{**}	313.40 ^{**}	115.34 ^{**}	122.55 ^{**}
		耕作×覆盖	80.56 ^{**}	69.16 ^{**}	44.18 ^{**}	16.76 ^{**}	20.37 ^{**}

CT;不同覆盖措施下平均单株结薯数 SM 处理最大, PM 处理和 NM 处理相近,平均单薯质量、单株产量由高到低依次为 SM、PM、NM。在所有处理中,平均单株结薯数以 NT×SM 处理最高,而单薯质量和单株产量均以 ST×SM 处理最高。NT×SM 处理较 CT×NM 处理平均单株结薯数显著增加 26.5%, ST×SM 处理较 CT×NM 处理平均单薯质量和单株产量分别显著增加 43.4% 和 42.1%。

两年研究期间,耕作方式、覆盖措施及其交互作用对马铃薯产量和商品薯率的影响均存在极显著差异。2014 年马铃薯块茎产量和商品薯率均高于 2015 年(表 3),这可能与不同试验年份马铃薯生育期降水分布有关。2014 年,同一覆盖措施下不同耕作方式对马铃薯产量的影响不显著。但在同一耕作方式下覆盖措施对马铃薯产量的影响极显著。在所有处理组合中,NT×SM 处理的马铃薯产量最高,ST×SM 处理次之,分别较 CT×NM 处理显著提高 51.8% 和 43.3%。2015 年,耕作方式、覆盖措施及其二者交互作用对马铃薯产量的影响均呈极显著水平。在所有的处理组合中,ST×SM 处理马铃薯产量最高,ST×PM 处理次之,分别较 CT×NM 处理显著提高 36.7% 和 20.8%。两年商品薯率与马铃薯产量变化一致,在 2 年试验期间,无论是耕作方式、覆盖措施及其交互作用对马铃薯商品薯率均有极显著影响。ST×SM 处理的平均商品薯率最高(89.6%),而 CT×NM 处理最低(78.0%)。综上分析发现,ST×SM 处理对提高马铃薯产量和商品薯率表现最佳,分别较 CT×NM 处理显著提高 40.0% 和 14.9%。

3 讨论

3.1 耕作覆盖下休闲期土壤的蓄水保墒效应

西北旱作农田休闲期实施保护性耕作可吸纳和保蓄更多的降水以促进作物生育期生长,而土壤水分的蓄保效果与耕作方式和覆盖措施显著相关^[18-19]。李俊红等^[20]研究表明,夏秋双深松覆盖能够增加土壤水分入渗,增加土壤蓄水保墒能力。刘继龙等^[21]试验发现,免耕结合秸秆覆盖对增强土壤水分特性效果更为显著,土壤水分有效性随覆盖量的增加而增强。李娟等^[22]认为,免耕/深松和连续免耕处理在冬闲期均能不同程度提高土壤的蓄水保墒能力,但免耕/深松处理在生育期蓄保水分效果更为明显。本研究发现,经历冬、春季休闲期,耕作方式、覆盖措施以及二者交互作用对土壤蓄水量及蓄水效率均有显著影响,其中 ST×SM 处理组合的土壤蓄水量和蓄水效率最高,这是由于深松能打破

犁底层,使降雨下渗较深,其蓄水效果增强,同时秸秆本身也可吸收大量的水分,能增加雨水入渗,减少地表蒸发,起到蓄水保墒的作用^[4, 23]。

3.2 耕作覆盖对苗期土壤水分和温度的影响

常晓等^[24]研究表明,在播后 30 d 持续干旱,与传统深翻处理相比,耕作结合秸秆覆盖措施调节土壤蓄水能力更为显著,0~60 cm 层土壤蓄水量显著增加 19.7%。刘爽等^[11]发现,不同耕作措施对春玉米苗期表层土壤含水率影响显著,与传统耕作相比,免耕结合秸秆覆盖措施能显著提高表层土壤水分含量,这可为作物苗期生长提供较好的水分条件。在本研究中,同一耕作方式下,不同覆盖措施两年马铃薯苗期 0~200 m 层土壤蓄水量存在显著差异,而同一覆盖处理下不同耕作方式对土壤蓄水量的影响不显著,MUPANGWA 等^[25]研究也得出类似结论,尽管在作物种植前耕作能收集更多的雨水,但不同耕作方式对土壤水分无显著影响。然而,覆盖措施显著改善土壤的水分状况,耕作与覆盖交互作用对两年作物苗期土壤蓄水量有显著影响,这与本研究结果一致,分析其原因是由于耕作处理后疏松土壤使总孔隙度增加,结合不同覆盖措施能进一步减少土壤蒸发,增加雨水入渗,使土壤水分含量增加^[5, 26-27]。

作物生长前期适宜的土壤温度可加快作物种子萌发和产量的形成^[28]。马铃薯适宜萌发的土壤温度为 12~16℃,快速萌发温度为 18~25℃,而较低的土壤温度和水分含量可延长作物出苗时间^[29]。本研究中,各处理的土壤温度均在马铃薯快速出苗温度的范围内。因此,表层土壤温度并不是限制马铃薯苗期生长的主要因子。覆盖措施、耕作与覆盖交互作用对土壤温度的影响显著,同一耕作方式下地膜覆盖处理可为马铃薯出苗提供良好的土壤温度条件,这是由于作物苗期植株较小,地膜覆盖能接收更多的太阳辐射,使表层温度升高^[30],但秸秆覆盖通常使表层土壤降温,可延迟作物幼苗的出苗时间^[31]。然而,在盛夏高温季节,热胁迫可能会成为限制马铃薯后期生殖生长的主要因素,耕作结合秸秆覆盖或移去地膜覆盖能降低表层土壤温度^[13, 32],从而利于马铃薯块茎产量的形成。

3.3 耕作覆盖对苗期生理生态的影响

王颖慧等^[33]研究证明,不同覆膜方式较不覆盖使叶片丙二醛含量处于较低水平,维持植株正常的生长代谢,其中以垄作覆膜和双垄全膜覆盖两种覆膜方式的效果最好。张保军等^[34]研究发现,保墒灌溉有利于小麦旗叶 MDA 含量积累速度延缓、抗氧化酶活性增强,提高细胞膜的抗损害能力,从而维持较好的光合功能,其中以免耕留茬和深松覆盖处理

效果最佳。本研究结果表明,在 2 年试验期内,耕作方式、覆盖措施以及二者交互作用对叶片抗氧化酶活性有显著影响。在同一耕作方式下,地膜和秸秆覆盖较不覆盖处理均能显著降低马铃薯叶片中抗氧化酶活性,这是因为耕作和覆盖改善了土壤水分和温度状况^[10, 12],降低了对植株的干旱胁迫程度,从而减少对膜系统的破坏,使马铃薯生长正常^[15-16]。

保护性耕作措施可增加作物出苗率,而常规耕作通常出苗率较低^[35]。ODJUGO^[36]研究表明,在耕作覆盖措施下,土壤水分含量越高,作物出苗率越高,适宜的土壤温度也有利于作物苗期生长。袁彦云^[37]研究表明,地膜覆盖、深松覆盖、免耕留茬,与传统耕作相比能提高出苗率,有效增加株高和叶面积,以地膜覆盖处理和深松覆盖处理最佳。赵天武等^[38]研究发现,免耕秸秆覆盖种植马铃薯可提高出苗率。本研究结果表明,耕作结合覆盖可显著影响作物苗期出苗率、株高和生物量。传统耕作不覆盖处理下马铃薯出苗率较低,致使苗期株高和生物量最低,而深松结合地膜覆盖处理下马铃薯出苗率最高,对作物前期生长的促进作用效果最好。这是因为两年研究期间耕作覆盖措施下土壤水分和温度条件较好,有利于马铃薯的出苗及生长,加速了马铃薯前期生育期进程^[39],而传统耕作不覆盖处理下植株则遭受严重的水分和温度胁迫,限制了马铃薯的正常生长发育^[32]。

3.4 耕作覆盖对马铃薯产量的影响

旱作农田采取少耕、免耕、深松以及配合覆盖措施是提高降水利用效率、增加马铃薯产量的有效手段^[4, 40]。王颖慧等^[33]研究报道,不同覆膜方式有利于提高旱作马铃薯的产量及产量构成(单株结薯数、单薯质量和单株产量),邝伟生等^[39]也发现,少耕覆盖稻草处理的马铃薯产量和单株产量最高,而商品薯率以免耕覆盖稻草处理最高。笔者前两年的研究^[4, 40]也证明,免耕、深松结合秸秆覆盖能显著提高马铃薯产量和商品薯率。在本研究中,耕作与覆盖交互作用对马铃薯产量构成及商品薯率有显著影响。这可能由于耕作覆盖措施可改善马铃薯苗期

土壤水温环境条件,这对作物后期生殖生长及产量的形成产生了积极影响^[28]。本研究还发现,在同一耕作方式下,秸秆覆盖处理的马铃薯产量最高,地膜覆盖处理次之。究其原因主要有两方面:①在气温较低的冬春闲期和苗期地膜覆盖能有效改善土壤的水温效应^[31]。②在马铃薯苗期,耕作结合秸秆覆盖土壤蓄水量较多,秸秆覆盖下较好的水分条件在一定程度上弥补了低温对马铃薯生长的影响^[14],从而促进马铃薯块茎产量的形成和提高。本研究中,干旱是限制马铃薯产量形成的主要因素,而土壤温度对马铃薯产量并没有显著影响。深松结合秸秆覆盖(ST×SM 处理)是更有利于马铃薯抗旱保苗、增加作物产量的农业措施。然而,旱作马铃薯苗期低温、干旱,生长后期高温不利于马铃薯的生殖生长,因此在考虑气候和环境可行性的同时,也要考虑在保护性耕作条件下用秸秆覆膜代替地膜覆盖或适时揭膜等措施以获得有利于马铃薯产量形成的水温条件,这还有待进一步深入研究。

4 结束语

休闲期耕作覆盖可显著影响土壤的蓄水保墒效应,其中以 ST×SM 处理组合的土壤蓄水量和蓄水效率最高。同一耕作方式下,地膜覆盖和秸秆覆盖处理可显著改善马铃薯苗期土壤水分和温度,有利于马铃薯苗期的生长。耕作方式、覆盖措施以及二者交互作用对叶片抗氧化酶活性均有显著影响,ST×SM 处理能使马铃薯苗期叶片过氧化氢酶活性、过氧化物酶活性、丙二醛含量处于较低水平。耕作与覆盖交互作用对马铃薯幼苗生长和块茎产量形成均有显著影响。与不覆盖处理相比,地膜和秸秆覆盖可显著提高马铃薯出苗率、株高及其生物量,有利于促进块茎产量的形成。在所有处理组合中,ST×SM 处理下马铃薯块茎产量和商品薯率最高,较传统耕作不覆盖处理分别显著提高 40.0% 和 14.9%。可见,深松结合秸秆覆盖措施可显著改善马铃薯苗期土壤水温环境,有利于马铃薯出苗、生长及其块茎产量的形成,可在宁夏南部旱作区应用推广。

参 考 文 献

[1] 侯贤清, 李荣, 何文寿, 等. 保水剂施用量对土壤水分利用及马铃薯生长的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2015, 41(5): 558-566.
HOU Xianqing, LI Rong, HE Wenshou, et al. Effects of super absorbent dosage on water use of soil and growth of potato[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2015, 41(5): 558-566. (in Chinese)

[2] 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.
XIAO Guojia, QIU Zhengji, ZHANG Fengju, et al. Influence of increased temperature on the potato yield and quality in a semiarid district of Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 830-836. (in Chinese)

[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.

- HOU Xianqing, NIU Youwen, WU Wenli, 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. (in Chinese)
- [4] 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. LI Rong, HOU Xianqing. Effects of different ground surface mulch under subsoiling on potato yield and water use efficiency [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(20): 115 – 123. (in Chinese)
- [5] 何明, 高焕文, 董培岩, 等. 一年两熟地区保护性耕作深松试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(7): 58 – 63. HE Ming, GAO Huanwen, DONG Peiyan, et al. Sub-soiling experiment on double cropping and conservation tillage adopted area[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(7): 58 – 63. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180707&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.007. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] HOU X Q, JIA Z K, HAN Q F, et al. Effects of rotational tillage practices on soil water characteristics and crop yields in semi-arid areas of North-west China[J]. *Soil Research*, 2011, 49(7): 625 – 632.
- [8] 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 – 477. WEI Huanhuan, WANG Shiwen, YANG Wenjia, et al. Meta analysis on impact of no-tillage and subsoiling tillage on spring maize and winter wheat yield and water use efficiency on the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(3): 461 – 477. (in Chinese)
- [9] 李荣, 侯贤清. 农业环保型材料覆盖技术研究进展[J]. *核农学报*, 2016, 30(11): 2282 – 2287. LI Rong, HOU Xianqing. Research progress of agricultural environmental-friendly material mulching technology[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(11): 2282 – 2287. (in Chinese)
- [10] YANG Y H, DING J L, ZHANG Y H, et al. Effects of tillage and mulching measures on soil moisture and temperature, photosynthetic characteristics and yield of winter wheat[J]. *Agriculture Water Management*, 2018, 201: 299 – 308.
- [11] 刘爽, 何文清, 严昌荣, 等. 不同耕作措施对旱地农田土壤物理特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(2): 65 – 70. LIU Shuang, HE Wenqing, YAN Changrong, et al. Effects of different tillage managements on soil physical properties in dryland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(2): 65 – 70. (in Chinese)
- [12] 武淑娜, 杨树青, 李文娟, 等. 覆盖耕作对岭南旱作大豆土壤水热及产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2019(8): 48 – 53. WU Shu'na, YANG Shuqing, LI Wenjuan, et al. Effects of coverage cultivation on soil water heat and yield of dryland soybean in southern foot of Daxing'an mountains[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(8): 48 – 53. (in Chinese)
- [13] 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. ZHANG Dongmei, ZHANG Wei, JIANG Chunxia, et al. Effects of different tillage and mulch treatments on the soil environment and yield of dryland maize[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(6): 26 – 37. (in Chinese)
- [14] 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 Rong, WANG Yanli, WU Pengnian, 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 CSAE*, 2017, 33(10): 168 – 175. (in Chinese)
- [15] 李倩, 刘景辉, 张磊, 等. 适当保水剂施用和覆盖促进旱作马铃薯生长发育和产量提高[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(7): 83 – 90. LI Qian, LIU Jinghui, ZHANG Lei, et al. Using water-retaining agent and mulch to improve growth and yield of potato under dry farming[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(7): 83 – 90. (in Chinese)
- [16] LI J H, CANG Z M, JIAO F, et al. Influence of drought stress on photosynthetic characteristics and protective enzymes of potato at seedling stage[J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2017, 16(1): 82 – 88.
- [17] HIRUT B G, SHIMELIS H, FENTAHUN M, et al. Combining ability of highland tropic adapted potato for tuber yield and yield components under drought[J]. *Plos One*, 2017, 12(7): e0181541.
- [18] SU Z Y, ZHANG J S, WUA W L, et al. Effects of conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(3): 307 – 314.
- [19] 杨清山, 孙敏, 高志强, 等. 黄土高原休闲期深松后覆盖播种对旱地小麦产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(2): 158 – 166. YANG Qingshan, SUN Min, GAO Zhiqiang, et al. Effect of sowing-mulching following subsoiling in fallow period on wheat yield in arid area on the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(2): 158 – 166. (in Chinese)
- [20] 李俊红, 姚宇卿, 吕军杰, 等. 双深松覆盖对丘陵旱区土壤水分和作物产量的影响[J]. *河南农业科学*, 2013, 42(11): 17 – 20. LI Junhong, YAO Yuqing, LÜ Junjie, et al. Effect of double-subsoiling cover on soil water and crop yield in hilly arid area [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2013, 42(11): 17 – 20. (in Chinese)
- [21] 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/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 333 – 339. LI Jilong, LI Jiawen, ZHOU Yan, et al. Effects of straw mulching and tillage on soil water characteristics [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7): 333 – 339. <http://www.j-csam.org/jcsam/ch/>

- reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190736&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 07. 036. (in Chinese)
- [22] 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 Juan, WANG Li, LI Jun, et al. Effects of rotational tillage on soil water content and crop yield of spring maize system on Weibei dryland[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 110 – 118. (in Chinese)
- [23] 刘丹, 张霞, 李军, 等. 渭北旱塬农田不同耕作模式对土壤性状、玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 573 – 582.
LIU Dan, ZHANG Xia, LI Jun, et al. Effects of different tillage patterns on soil properties, maize yield and water use efficiency in Weibei Highland, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(2): 573 – 582. (in Chinese)
- [24] 常晓, 魏克明, 王和洲, 等. 不同耕作方式对夏玉米田土壤水分调控效应[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(4): 75 – 78.
CHANG Xiao, WEI Keming, WANG Hezhou, et al. Effects of different tillage on soil water content of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(4): 75 – 78. (in Chinese)
- [25] MUPANGWA W, TWOMLOW S, WALKER S, et al. Effect of minimum tillage and mulching on maize (*Zea mays* L.) yield and water content of clayey and sandy[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2007, 32(15 – 18): 1127 – 1134.
- [26] RAMAKRISHNA A, TAM H M, WANI S P, et al. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in Northern Vietnam[J]. Field Crops Research, 2006, 95(2 – 3): 115 – 125.
- [27] 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(1): 7 – 13.
- [28] ZHAO H, WANG R Y, MA B L, et al. Ridge-furrow with full plastic film mulching improves water use efficiency and tuber yields of potato in a semiarid rainfed ecosystem[J]. Field Crops Research, 2014, 161: 137 – 148.
- [29] 张永成, 田丰. 马铃薯试验研究方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [30] LIU Y, YANG S J, LI S Q, et al. Growth and development of maize (*Zea mays* L.) in response to different field water management practices: resource capture and use efficiency[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(4): 606 – 613.
- [31] GAN Y T, SIDDIQUE K H M, TURNER N C, et al. Ridge-furrow mulching systems: an innovative technique system for boosting crop productivity in semiarid rainfed environments[J]. Advances in Agronomy, 2013, 118: 429 – 476.
- [32] ZHAO H, XIONG Y C, LI F M, et al. Plastic film mulch for half growing-season maximized WUE and yield of potato via moisture-temperature improvement in a semi-arid agroecosystem[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104: 68 – 78.
- [33] 王颖慧, 蒙美莲, 张静, 等. 覆膜方式对旱作马铃薯若干生理指标的影响[J]. 中国马铃薯, 2012, 26(6): 336 – 340.
WANG Yinghui, MENG Meilian, ZHANG Jing, et al. Effects of different film-covering modes on physiological indexes of potato on dryland tillage[J]. Chinese Potato Journal, 2012, 26(6): 336 – 340. (in Chinese)
- [34] 张保军, 袁彦云, 徐福利, 等. 保墒灌溉对渠灌类型区冬小麦产量构成及生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2006, 26(11): 2367 – 2371.
ZHANG Baojun, YUAN Yanyun, XU Fuli, et al. Effects of moisture-retaining irrigation on yield composition and physiological characters of winter wheat in canal irrigation region[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, 26(11): 2367 – 2371. (in Chinese)
- [35] HEMMAT A I, ESKANDARI I. Dryland winter wheat response to conservation tillage in a continuous cropping system in northwestern Iran[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 86(1): 99 – 109.
- [36] ODJUGO P A O. The effect of tillage systems and mulching on soil microclimate, growth and yield of yellow yam (*Dioscorea cayenensis*) in midwestern Nigeria[J]. African Journal of Biotechnology, 2008, 7(24): 4500 – 4507.
- [37] 袁彦云. 半湿润渠灌区保墒灌溉对冬小麦水分养分及产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
YUAN Yanyun. Impact on soil moisture and nutrient as well as winter wheat yield with moisture conservational tillage in channel irrigate area[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2006. (in Chinese)
- [38] 赵天武, 黄高宝, 轩春香, 等. 黄土高原旱地不同保护性耕作措施对马铃薯田土壤水温效应及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 101 – 106, 118.
ZHAO Tianwu, HUANG Gaobao, XUAN Chunxiang, et al. Different conservation tillage related with soil water, soil temperature and yield of potato in rainfed farming system[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(1): 101 – 106, 118. (in Chinese)
- [39] 邝伟生, 张雪, 刘玉佩, 等. 不同耕作方式对冬种马铃薯产量和品质的影响[J]. 广西农业科学, 2008(1): 30 – 32.
KUANG Weisheng, ZHANG Xue, LIU Yupei, et al. Effects of different cultivation models on yield and quality of winter-planting potato[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2008(1): 30 – 32. (in Chinese)
- [40] 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 Xianqing, LI Rong. Effects of mulching with no-tillage on soil physical properties and potato yield in mountain area of Southern Ningxia[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(19): 112 – 119. (in Chinese)