

覆膜对半干旱地区马铃薯生长生理性状及作物产量的影响

禄兴丽[#], 段雅欣[#], 李闪闪, 岳衡, 吴佳瑞, 刘继虎, 康建宏^{*}

宁夏大学农学院, 银川750021

[#]共同第一作者

^{*}通信作者(kangjianhong@163.com)

摘要: 本文为探明宁夏南部半干旱雨养农业区不同膜色地膜覆盖对旱作区马铃薯生长代谢、抗性生理、光合特性以及增产增效的影响。在2016和2017年以马铃薯‘青薯9号’为试验材料, 设置黑色地膜覆盖(BM)、白色地膜覆盖(WM)和对照无膜覆盖(CK)三种覆盖措施, 探究不同处理下马铃薯植株株高、冠幅、功能叶片光合特性、丙二醛含量、细胞膜透性、根系活力以及干物质积累的动态变化和产量及构成。结果表明, BM能显著促进马铃薯植株的生长、提升产量。相较于CK和WM, BM处理下马铃薯叶片的净光合速率、株高、冠幅和根系活力显著提高, 蒸腾速率、丙二醛含量和细胞膜透性明显降低。除此之外, 覆膜提升了各器官的干物质质量积累量, 从而显著增加马铃薯产量及产量构成。综合2年结果来看, BM处理的马铃薯具有较高干物质积累量和产量, 产量分别较WM和CK显著增加17.85%和60.52%。相关性分析表明, 除蒸腾速率、丙二醛含量以及细胞膜透性与产量存在负相关性以外, 其他指标均与产量呈正相关, 且与根系活力间的相关性最显著。可见, 覆膜措施能有效促进马铃薯生长代谢, 缓解干旱对马铃薯的生理限制, 且黑膜覆盖措施增产增效更佳, 因此黑膜覆盖技术的应用与推广对该区马铃薯高效栽培具有重要价值。

关键词: 地膜覆盖; 马铃薯; 生长代谢; 抗性生理; 光合特性; 产量

Effect of film mulching on potato physiological characters and production in semi-arid area

LU Xingli[#], DUAN Yaxin[#], LI Shanshan, YUE Heng, WU Jiarui, LIU Jihu, KANG Jianhong^{*}

Agronomy of College, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

[#]Co-first authors

^{*}Corresponding author (kangjianhong@163.com)

Abstract: The purpose of this paper was to investigate the effects of different colors of mulch on growth metabolism, resistance physiology, photosynthetic characteristics and yield and efficiency of potato in the semi-arid rainfed agricultural area of southern Ningxia. In this paper, we set up black film mulching (BM), white film mulching (WM) and control mulching (CK) in 2016 and 2017 with ‘Qingshu No. 9’ as the experimental material. We investigated the dynamic changes in plant height and crown width, photosynthetic characteristics of functional leaves, malondialdehyde content, cell membrane permeability, root vigor and dry matter accumulation, and yield and composition of potato plants under different treatments with three mulching measures, namely, black mulch (BM), white mulch (WM) and no mulch (CK). The results showed

收稿 2020-12-04 修定 2021-05-22

资助 国家自然科学基金(31860361和31860336)、宁夏自然科学基金(2019AAC03055和2019AAC03065)、第四批“宁夏青年科技人才托举工程”(宁科协[2019]号)(TJGC2019075)、2019年大学生创新创业项目(2019107490547)和2021年宁夏大学农学院大学生创新创业训练计划项目(NXY202103)。

that BM could significantly promote the growth and yield of potato plants. The net photosynthetic rate, plant height, crown width and root vigor of potato leaves were significantly higher and transpiration rate, malondialdehyde content and cell membrane permeability were significantly lower under BM treatment compared to CK and WM. In addition, mulching enhanced dry matter accumulation in all organs, which significantly increased potato yield and yield components. Based on the results of the two years, potatoes under BM treatment had higher dry matter accumulation and yield, with a significant increase of 17.85% and 60.52% in yield compared to WM and CK, respectively. Correlation analysis showed that all indicators were positively correlated with yield, except transpiration rate, malondialdehyde content and cell membrane permeability, which were negatively correlated with yield, and the most significant correlation was with root vigor. It can be seen that the mulching measures can effectively promote potato growth and metabolism, alleviate the physiological constraints of drought on potato, and the black film mulching measures increase yield and efficiency, so the application and promotion of black film mulching technology is greatly valuable to the efficient cultivation of potato in this region.

Key words: film mulching; potato; growth metabolism; resistance physiology; photosynthetic characteristics; yield

宁夏南部山区因其气候凉爽、昼夜温差较大、土壤环境适宜等生态区域优势成为马铃薯北方种植主产区之一, 但该区域兼有干旱且少雨的特点, 加以灌溉条件缺乏、灾害性气候变化等因素的影响抑制了马铃薯的遗传潜力, 从而阻碍作物根系结构与作物形态的发育, 出现生长受抑、光合作用降低和膜脂过氧化等现象, 进而严重威胁马铃薯优质高产的发展, 故干旱胁迫成为该区马铃薯区域经济发展的主要瓶颈之一(侯贤清和李荣2015), 因此在现有天然降雨条件的基础上改善作物生长代谢的田间环境, 促进其发育良好, 同时在确保基本粮食供求的基础上实现作物的高产高效成为目前亟待研究的问题。地膜覆盖技术是为了落实节水农业的宗旨而发展起来的, 是传统农业的集约化和现代化, 主要目的即为调控和改善干旱地区作物生长代谢与生理生态(高世铭等2010; 薛俊武2014)。地膜覆盖技术在干旱地区的应用, 有效地调控土壤中水分在时间空间上的再分配、降低热量散失与棵间蒸发, 促进作物的光合作用和生长发育, 进而优化植株的生长环境及作物的质量产量(Liu等2009)。所以地膜覆盖能够使旱区马铃薯的发育呈现正生长效应, 是借助农艺措施解决雨养农业区干旱胁迫的较好选择。有关覆膜栽培种植马铃薯的研究表明, 黑色地膜能更好地发挥抗

旱增产的作用(王成刚和水建兵2010), 相比于普通白色地膜因透光性较好的特点导致土壤热量过甚、温度过高而引起马铃薯生长发育早期的烧苗现象以及收获后绿薯率增加等缺陷, 黑色地膜覆盖具有适度升温、平抑地温、改善干旱对马铃薯造成的危害、降低绿薯率等优势(雷俊等2017)。

马铃薯生长生理性状等是马铃薯块茎淀粉形成机理的明显表征, 可以作为鉴定马铃薯品质的关键性参考指标(张新永和郭春华2004)。在众多影响因子中, 马铃薯生长生理指标对干旱最为敏感, 同时, 干旱胁迫也是造成旱区马铃薯减产的重要原因(胡田田和康绍忠2005)。目前关于覆膜栽培技术对马铃薯品质影响的研究已有大量报道, 如覆膜对马铃薯光合特性(雷俊等2017)、淀粉积累(吴佳瑞等2019)、增产增效(任莉萍2017)、水热效应(王红丽等2016)及其土壤性状(侯贤清和李荣2015)和生态效应(蒋锐等2018)等都有相关的研究。但前人侧重于马铃薯生长代谢对单一的覆膜方式的响应, 但缺乏以无膜覆盖作对照, 探讨马铃薯覆盖不同膜色地膜的研究, 尤其是以生长、生理双重性状的动态变化角度入手, 系统地阐明马铃薯增产增效机制。

本试验以马铃薯‘青薯9号’作为试材, 在宁南山区进行了为期2年的大田定点试验, 研究以无膜

覆盖作为对照,黑膜覆盖和白膜覆盖下马铃薯部分生长生理指标的动态变化与光合产物积累及产量的变化规律,以阐明不同覆膜措施对马铃薯生长代谢以及块茎淀粉形成的影响,为旱区马铃薯生态安全、增产增效的栽培技术提高实践支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2016–2017年在宁夏回族自治区中南部的海原县树台乡大嘴村的大坝台试验基地(36°06′~37°04′N, 105°09′~106°10′E)进行,属于典型半干旱气候区,海拔高度2 168 m,年平均气温7°C,年平均降水量300 mm,降水大多集中在秋季,无霜期151~171 d,土壤类型为侵蚀黑垆土。主要理化性质如下: pH为8.11,有机质含量8.55 g·kg⁻¹,碱解氮含量35.59 mg·kg⁻¹,速效磷含量10.86 mg·kg⁻¹,速效钾含量217.65 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验马铃薯的品种是宁南山区主栽马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)品种‘青薯9号’原种,试验设计为单因素随机区组,设置覆盖黑色地膜(BM)、覆盖白色地膜(WM)和无膜覆盖(CK) 3个处理,每个处理重复4次,小区宽4 m、长10 m,共12个小区,小区走道间隔1 m,每个小区4垄,单垄双行半覆膜,宽(60 cm)窄(40 cm)行种植,株距为30 cm,种植深度为20~25 cm。种植密度为50 000株·hm⁻²,用种量1 800 kg·hm⁻²。所有处理进行了统一的田间管理,定期进行人工除草,具体施肥措施为:播种前基施尿素(N≥46%) 273 kg·hm⁻²、重过磷酸钙(P₂O₅≥46%) 750 kg·hm⁻²、硫酸钾(K₂O≥50%) 90 kg·hm⁻²,追肥于马铃薯现蕾期(7月初)追施尿素(N≥46%) 117 kg·hm⁻²。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 株高、冠幅

选取10株能够代表整个小区整体长势的马铃薯植株,于马铃薯苗期、现蕾期、块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期和成熟期,定点定株测定自然株高(生长点至地上茎的基部之间的距离)和冠幅(冠幅以马铃薯南北和东西方向宽度的平均值表示)。

1.3.2 光合特性

于马铃薯6个生育时期,利用TPS-2型便携式光合仪(美国汉莎公司)于晴天的上午9点到11点,在每小区随机选取5株马铃薯上部同一方位的功能叶片分别测定不同处理下马铃薯叶片的蒸腾速率(T_r)与净光合速率(P_n)。

1.3.3 根系活力、细胞膜透性、丙二醛含量

于马铃薯6个生育时期,在破坏性小区随机采取5株马铃薯放入保鲜袋,并采摘同一部位的功能叶片于冰盒,带回实验室测定生理指标。根系活力采用收集伤流量称重的方法测定(卢贤丰1997)。细胞膜透性采用电导仪法测定,丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量采用双组分分光光度计法测定(邹琦2007)。

1.3.4 光合产物积累

每个生育时期破坏性取样带回实验室的植株样品,首先冲洗粘附在植株根系和块茎上的泥土,并按不同器官分开,然后用水分别冲洗至干净,最后用滤纸吸干水分后,立即称取各部分鲜重;将经处理的各器官置于烘箱,于105°C条件下杀青,烘30 min,然后降温至85°C烘12 h,冷却称重后用同样方法继续烘干至恒重。

1.3.5 产量

于马铃薯成熟后在每小区选取中间的两垄实地测产(避开破坏性取样小区),依据吕文河等(2014)对马铃薯的分级标准,对小区大、中、小薯的个数进行考察,同时测量单株薯数、薯重,并计算大薯、小薯和中薯的薯率。

1.4 统计分析

采用Microsoft Excel 2010与SPSS 21.0进行数据分析处理,Origin 2018软件进行作图,显著水平为($P<0.05$, $n=5$),图表中数据用平均值±标准误表示。

2 实验结果

2.1 覆膜对马铃薯株高和冠幅的影响

如表1所示,马铃薯植株的株高在苗期至淀粉积累期表现为逐渐增加的趋势,在成熟期有所降低。2017年不同处理下各个时期的马铃薯植株株高均高于2016年,且2年中BM和WM处理的株高在整个生育期内均显著高于CK, BM处理与WM处理

没有显著的差异。在整个生育期内, 2016年BM和WM两种处理的株高(38.48和37.27 cm)较CK处理(27.06 cm)分别高42.22%、37.73%, 2017年BM和WM两种处理的株高(41.02和39.99 cm)较CK处理(28.83 cm)分别高42.29%、38.73%。

马铃薯在不同的生长阶段不同的处理下其冠幅呈现先增长后下降的变化趋势, 于块茎膨大期马铃薯的冠幅出现最大值(表1)。2016年除块茎膨大期外的生育期, 相较于CK, BM和WM处理的冠幅显著增加。而2017年BM与WM处理下的冠幅在现蕾期、淀粉积累期和成熟期与CK差异显著, BM与WM处理在这三个时期分别较CK增加14.92%、23.89%、24.61%和16.49%、15.87%、18.66%。可见, 覆膜处理因其能抑制棵间蒸发及保水性能较好, 从而对马铃薯植株生长(株高及冠幅)有明显的促进作用。

2.2 覆膜对马铃薯生理指标的影响

2.2.1 净光合速率(P_n)

光合特性是作物能量转化和物质代谢的源动力, 可以作为衡量作物产量的基础。光合特性中净

光合速率代表作物进行光合作用积累的有机物, 蒸腾速率则可以反映作物对水分吸收和运输的程度, 实时获取作物光合特性的动态变化, 便于对作物最终产量的预判。

从苗期至块茎膨大期, 3种处理下的马铃薯功能叶片净光合速率在2016和2017年均表现为先上升后下降的趋势, 峰值在块茎形成期出现(图1)。2016年除苗期、块茎形成期和块茎膨大期外, BM处理的马铃薯功能叶片净光合速率在其余几个生育期均与WM处理差异显著, 较WM处理提高23.64%、220.06%和20.56%, 在整个生育期均与CK有显著差异。WM处理的马铃薯功能叶片净光合速率在苗期、块茎形成期和块茎膨大期与CK形成明显差异, 较之提高30.47%、71.92%和21.53%。

而在2017年, BM处理的马铃薯功能叶片净光合速率在现蕾期、块茎形成期和块茎膨大期与WM及CK两种处理均差异显著, 较WM处理提高31.24%、25.55%和38.40%, 较CK提高51.80%、64.15%和68.02%。WM处理的马铃薯功能叶片净光合速率在苗期、块茎形成期和淀粉积累期显著

表1 覆膜对马铃薯植株生长指标的影响

Table 1 Effects of film mulching on growth index of potato plant

年份	处理	株高/cm					
		苗期	现蕾期	块茎形成期	块茎膨大期	淀粉积累期	成熟期
2016	不覆膜	7.60±0.67 ^b	10.90±0.91 ^b	24.05±2.03 ^b	37.90±2.83 ^b	41.90±2.58 ^b	40.00±2.74 ^b
	黑膜	13.90±0.53 ^a	19.20±1.00 ^a	40.70±1.58 ^a	51.30±2.25 ^a	53.20±4.52 ^a	52.60±1.48 ^a
	白膜	13.80±0.88 ^a	19.00±1.33 ^a	40.50±2.23 ^a	48.80±2.57 ^a	51.30±2.34 ^a	50.20±4.32 ^a
2017	不覆膜	9.35±1.07 ^b	13.00±1.87 ^b	28.30±1.90 ^b	38.55±2.17 ^b	43.20±1.93 ^b	40.55±2.48 ^b
	黑膜	14.50±0.91 ^a	21.85±1.71 ^a	42.94±2.17 ^a	55.00±2.00 ^a	57.60±2.84 ^a	54.20±1.73 ^a
	白膜	14.00±0.82 ^a	22.00±1.98 ^a	41.56±1.84 ^a	53.28±2.45 ^a	55.60±2.93 ^a	53.50±1.86 ^a
年份	处理	冠幅/cm					
		苗期	现蕾期	块茎形成期	块茎膨大期	淀粉积累期	成熟期
2016	不覆膜	15.17±1.07 ^b	34.33±1.76 ^b	50.73±1.79 ^b	67.83±1.64 ^a	40.63±4.01 ^b	29.70±1.52 ^b
	黑膜	22.63±1.73 ^a	41.63±0.74 ^a	59.60±1.75 ^a	73.30±2.03 ^a	47.60±3.88 ^a	33.50±1.97 ^a
	白膜	21.20±1.45 ^a	39.53±1.84 ^{ab}	55.40±1.03 ^{ab}	70.57±2.43 ^a	48.10±3.80 ^a	34.90±2.95 ^a
2017	不覆膜	20.42±1.92 ^a	38.20±1.92 ^b	58.10±2.41 ^a	74.30±4.87 ^a	42.40±2.01 ^b	33.60±1.71 ^b
	黑膜	25.06±2.05 ^a	43.90±0.83 ^a	68.00±2.47 ^a	79.50±2.00 ^a	52.53±2.49 ^a	41.87±2.98 ^a
	白膜	25.60±1.69 ^a	44.50±2.17 ^a	63.90±6.72 ^a	77.00±3.66 ^a	49.13±2.97 ^{ab}	39.87±1.99 ^{ab}

不同小写字母表示各处理间在 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同。

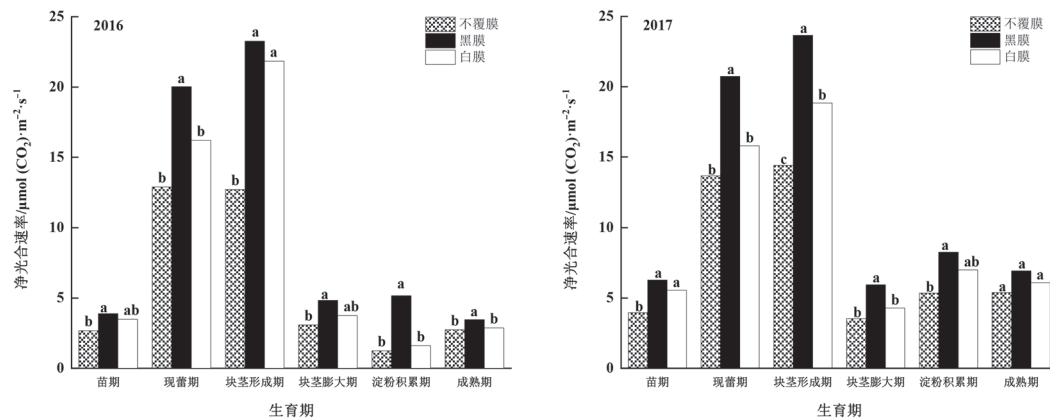


图1 覆膜对马铃薯叶片净光合速率的影响

Fig. 1 Effects of film mulching on net photosynthetic rate of potato leaves

不同小写字母表示同一生育期不同处理在 $P < 0.05$ 水平上呈显著差异。下图同此。

高于CK, 较CK提高40.25%、30.74%和30.73%。

2.2.2 蒸腾速率(T_r)

如图2所示, 2016与2017年BM和WM处理的马铃薯功能叶片蒸腾速率同在苗期显著低于CK。2016年BM处理的马铃薯功能叶片蒸腾速率只在现蕾期与WM处理差异显著, 较WM处理降低23.54%, 其余生育期没有明显差异。2017年BM处理与WM处理在各个生育期均无明显差异。

2.2.3 根系活力

作物根系通过吸收土壤中的水分从而感知土壤水环境的动态变化和土壤中的水分信号, 进而调控作物的生长发育以及针对外界环境作出相应

调整。根系活力作为表征作物根系形态结构发育和摄取水分、养分能力的关键指标, 具有代表性的研究意义(潘晓迪等2017)。在不同膜色地膜覆盖下, 马铃薯整个生育期内根系活力的变化呈单峰曲线趋势, 并且不同处理均是在块茎形成时期形成峰值。2年均是在马铃薯苗期之后, BM和WM两种处理的马铃薯根系活力有明显高于CK的趋势。在现蕾期和淀粉积累期, BM处理下马铃薯的根系活力与WM及CK处理间存在显著差异。综合整个生育期来看, 2016年BM和WM处理的马铃薯根系活力(27.75 和 $24.82 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$)较CK ($20.11 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$)分别高出38.01%和23.45%, 2017年BM和WM处理的马铃薯

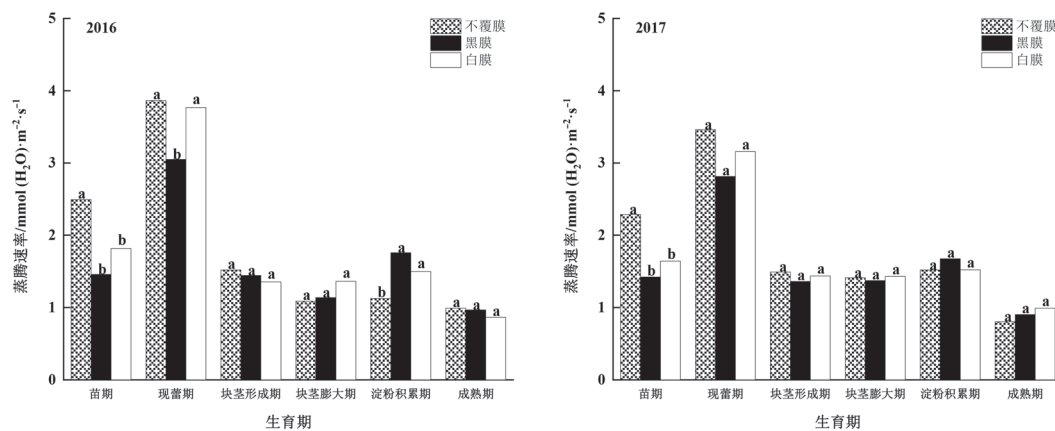


图2 覆膜对马铃薯叶片蒸腾速率的影响

Fig. 2 Effects of film mulching on transpiration rate of potato leaves

根系活力(28.44 和 $26.37 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$)较CK ($20.91 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$)分别高出 36.03% 和 26.13% 。2016年和2017年BM处理的马铃薯根系活力较WM处理分别高出 11.80% 和 7.85% (图3)。说明在马铃薯生长发育期覆膜能够提高马铃薯的根系活力, 进而表现为水分、养分的吸收能力增强、产量有所提升。

2.2.4 MDA含量

MDA是作物器官在逆境或衰老条件下发生膜脂过氧化反应的产物之一, MDA具细胞毒性, 会导致核酸、蛋白质等交联聚合。细胞膜脂的过氧化程度的轻重可用MDA含量代表, 是植物应对逆境胁迫时受伤害程度的体现(李雪凝等2016)。如图4所示, 叶片MDA含量从马铃薯现蕾期开始逐渐增加直至成熟期。2年均除现蕾期外的其他生育期, BM和WM两种处理的叶片MDA含量与CK存在显著的差异。综合整个生育期来看, 2016年BM和WM两种处理的叶片MDA含量 $[28.09$ 和 $31.42 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ (FW)]较CK $[39.55 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ (FW)]分别降低 40.76% 和 25.85% , 2017年BM和WM两种处理的叶片MDA含量 $[26.12$ 和 $28.88 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ (FW)]较CK $[33.63 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ (FW)]分别降低 28.74% 和 16.47% 。可知, 覆盖地膜可以降低叶片细胞膜脂的过氧化程度, 延缓叶片老化, 同时也使马铃薯植株在逆境胁迫下的调控增强。

2.2.5 细胞膜透性

功能叶片细胞膜透性的大小可以用来衡量作

物抗逆性和逆境胁迫的强弱程度。在马铃薯各个生育期内, 细胞膜透性在覆膜处理下有所降低(图5), 综合2年来看, 从苗期至块茎膨大期, 膜透性呈逐渐增加的趋势, 块茎膨大期至淀粉积累期, 膜透性开始下降。2016年除块茎形成期和淀粉积累期的其他四个生育期, BM和WM两种处理的叶片细胞膜透性与CK有明显差异, 在这四个时期下BM处理较CK降低 23.89% 、 9.50% 、 8.20% 和 3.53% ; WM处理较CK降低 14.55% 、 3.77% 、 0.87% 和 1.75% 。2017年则是除现蕾期和成熟期外的4个生育期内3个处理之间的差异显著。因此, 覆膜能够一定程度降低马铃薯叶片的细胞膜透性以及膜透性的增加幅度, 增强作物的抗逆性, 最终提高产量。

2.3 覆膜对马铃薯光合产物积累的影响

光合产物积累即干物质积累, 块茎产量的形成体现在马铃薯干物质层面上即为分配和积累的过程。2年结果显示, 在各个生育阶段, 不同处理下马铃薯地上与地下的干物质积累量表现出相同的变化趋势(表2), 地上部的干物质积累量从苗期至淀粉积累期逐渐增加到峰值而后下降, 地下块茎的积累量随生育期的变化而逐渐增加, 在成熟期有最大值。2017年不同处理下马铃薯各器官的干物质质量在各个发育阶段的积累均高于2016年。同时, 2年各个发育阶段各器官的干物质积累量的结果均是BM>WM>CK。2016年BM和WM处理下的叶、地上茎、块茎积累量较CK分别提高 78.14% 、

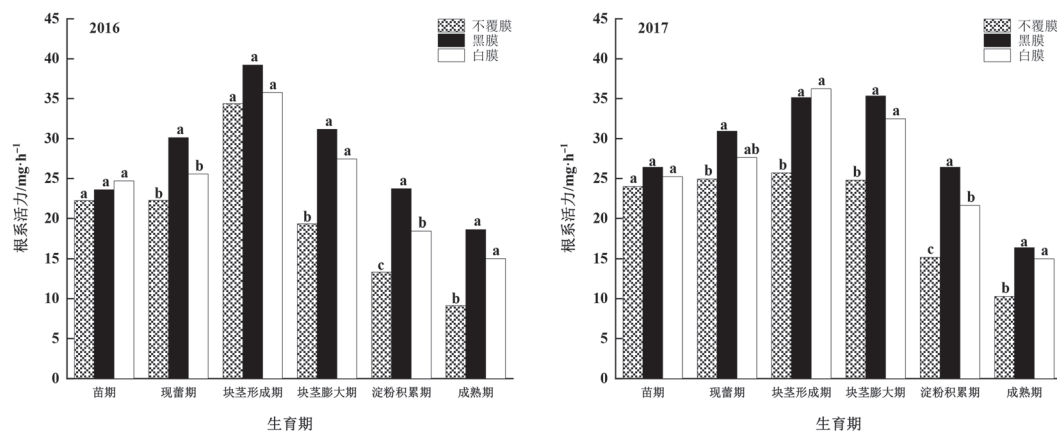


图3 覆膜对马铃薯根系活力的影响

Fig. 3 Effects of film mulching on root vitality of potato

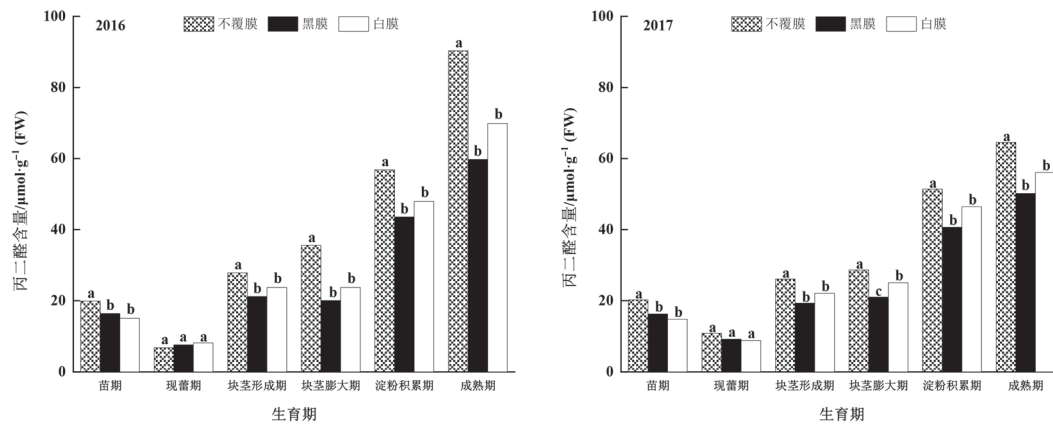


图4 覆膜对马铃薯叶片MDA含量的影响

Fig. 4 Effects of film mulching on malondialdehyde content of potato leaves

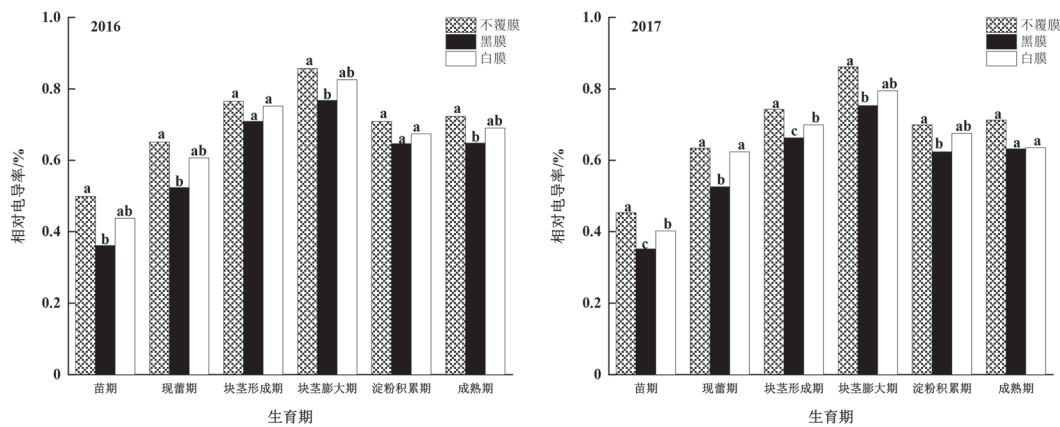


图5 覆膜对马铃薯叶片细胞膜透性的影响

Fig. 5 Effects of film mulching on cell membrane permeability of potato leaves

77.78%、82.65%和32.40%、25.34%、19.90%，2017年BM和WM处理下的叶、地上茎、块茎积累量较CK分别提高37.75%、17.12%、58.51%和26.11%、10.08%、33.73%。

2.4 覆膜对马铃薯产量的影响

覆盖地膜促进作物增产主要取决于生育期内降雨持续周期与降雨量，试验区2016年的降雨量在马铃薯淀粉积累期较少，造成部分植株死亡，而2017年在马铃薯生育期的降雨量较高，且在大田试验下，年际间的环境因素对作物产量的影响比重大，因此2017年不同处理下的马铃薯产量均高于2016年。结果(表3)显示，覆盖地膜明显提高了马铃薯的每穴薯重和每穴薯数 2016年BM和WM处理

的每穴薯重和每穴薯数较CK分别提高62.96%和29.63%、57.06%和33.62%，2017年BM和WM处理的每穴薯重和每穴薯数较CK分别提高57.14%和40.00%、47.80%和26.21%。2年内不同处理的大、中、小薯数均为BM>WM>CK，大薯率和中薯率也是BM>WM>CK，而小薯率为CK>WM>BM。马铃薯产量在覆盖地膜后显著提高，且黑色地膜增产效果更为明显，综合2年结果可知，丰水年或贫水年，BM处理相对于WM处理和CK，增产最为显著，同时有效增加了每穴薯数、薯重及大薯数、大薯率，明显降低小薯率。

2.5 马铃薯产量与生长、生理性状的相关性分析

由表4可知，马铃薯的相关生长、生理指标和

表2 覆膜对马铃薯干物质积累的影响

Table 2 Effects of film mulching on dry matter accumulation of potato

年份	处理	叶干物质积累量/g					
		苗期	现蕾期	块茎形成期	块茎膨大期	淀粉积累期	成熟期
2016	不覆膜	2.86±0.47 ^c	14.52±1.76 ^c	18.13±4.80 ^b	18.55±2.94 ^b	20.12±5.26 ^b	19.51±2.85 ^a
	黑膜	12.53±1.99 ^a	26.99±0.86 ^a	28.25±6.43 ^a	33.29±6.94 ^a	37.43±6.11 ^a	28.41±2.02 ^a
	白膜	8.73±0.28 ^b	21.05±3.40 ^b	21.67±0.68 ^b	21.96±0.57 ^b	27.03±1.86 ^b	23.61±3.39 ^a
2017	不覆膜	9.85±0.15 ^b	30.14±0.86 ^b	33.73±1.16 ^b	39.56±1.25 ^b	40.63±0.64 ^c	30.14±0.33 ^b
	黑膜	17.24±1.64 ^a	37.67±0.62 ^a	46.56±1.95 ^a	49.86±0.24 ^a	55.95±0.89 ^a	46.25±0.16 ^a
	白膜	13.12±0.33 ^b	36.21±0.75 ^a	43.03±1.43 ^{ab}	46.87±1.07 ^a	49.49±0.74 ^b	43.38±1.29 ^a
年份	处理	地上茎干物质积累量/g					
		苗期	现蕾期	块茎形成期	块茎膨大期	淀粉积累期	成熟期
2016	不覆膜	1.01±0.35 ^c	8.84±2.05 ^a	12.70±3.12 ^a	19.52±3.12 ^b	20.93±3.06 ^b	15.01±2.97 ^b
	黑膜	4.62±0.38 ^a	12.29±1.18 ^a	19.53±3.51 ^a	30.83±7.22 ^a	41.94±6.57 ^a	29.48±3.40 ^a
	白膜	2.31±1.29 ^b	10.45±0.45 ^a	15.11±3.51 ^a	20.68±2.15 ^b	28.06±4.33 ^b	21.17±6.19 ^b
2017	不覆膜	4.99±0.17 ^c	13.50±1.69 ^a	30.93±0.35 ^a	31.38±2.08 ^b	42.17±1.13 ^b	37.93±1.43 ^b
	黑膜	9.96±0.34 ^a	16.96±0.57 ^a	34.68±1.64 ^a	35.95±0.61 ^a	46.69±0.63 ^a	44.20±2.00 ^a
	白膜	7.89±0.40 ^b	14.45±1.40 ^a	32.46±0.85 ^a	34.77±2.70 ^a	44.52±1.57 ^{ab}	43.03±2.93 ^a
年份	处理	块茎干物质积累量/g					
		苗期	现蕾期	块茎形成期	块茎膨大期	淀粉积累期	成熟期
2016	不覆膜	—	—	8.22±2.30 ^a	30.80±8.22 ^a	49.47±1.93 ^c	67.73±7.01 ^b
	黑膜	—	—	13.33±1.88 ^a	47.26±5.24 ^a	96.63±3.77 ^a	128.12±5.11 ^a
	白膜	—	—	9.35±2.19 ^a	36.14±3.16 ^a	54.84±2.50 ^b	86.97±2.14 ^b
2017	不覆膜	—	—	16.59±0.37 ^b	44.89±0.46 ^c	93.27±3.21 ^c	126.71±3.88 ^c
	黑膜	—	—	22.27±0.86 ^a	64.34±3.08 ^a	143.10±2.37 ^a	216.44±6.31 ^a
	白膜	—	—	20.88±0.95 ^a	52.91±1.65 ^b	114.93±5.64 ^b	187.69±5.20 ^b

产量有较好的相关性,产量与株高、冠幅、净光合速率、根系活力以及干物质积累量呈正相关,与蒸腾速率、MDA含量和细胞膜透性呈负相关,说明马铃薯的生长代谢及发育与植株的株高、冠幅、根系活力,功能叶片的光合特性、细胞膜透性、MDA含量等指标的优劣密切相关。干物质量与蒸腾速率、净光合速率以及细胞膜透性呈显著的相关性,即这些指标的变化可显著影响马铃薯的光合产物积累及产量,前面的分析表明,与对照相比,黑膜覆盖对功能叶片蒸腾速率、净光合速率和细胞膜透性的影响均大于白膜覆盖处理,说明黑膜处理对于提升产量的效果更为明显。除此之外,其他指标之间也存在相关性,冠幅与株高、根系活力呈显著正相关,MDA含量与冠幅呈显著负相

关,净光合速率与蒸腾速率呈显著负相关,细胞膜透性与蒸腾速率呈极显著正相关、与净光合速率呈显著负相关,MDA含量与根系活力呈极显著负相关。

3 讨论

3.1 不同地膜覆盖对马铃薯生长性状的影响

覆盖措施的应用主要分布于像内蒙古、西北这样土壤水分欠缺,积温不足的地区(田德珍和姜未罢2005),合理的覆盖措施对于作物生长有促进效应,同时可使作物稳产高产,作物的生长发育状况最直观的体现就是作物的形态生长指标,相关研究显示,相比于无膜覆盖,覆膜栽培能显著提高旱作区马铃薯植株各个生长期的株高、冠幅(孙梦

表3 覆膜对马铃薯产量及产量构成的影响
Table 3 Effects of film mulching on potato yield and its component factors

年份	处理	每穴薯重/kg	大薯			中薯			小薯			产量/kg·hm ⁻²
			薯数/个·穴 ⁻¹	薯率/%	薯数/个·穴 ⁻¹	薯率/%	薯数/个·穴 ⁻¹	薯率/%	薯数/个·穴 ⁻¹	薯率/%		
2016	不覆膜	0.27±0.07 ^c	3.54±0.08 ^c	0.29±0.01 ^c	8.28±0.33 ^b	0.39±0.08 ^c	11.11±0.36 ^a	2.85±0.08 ^b	80.61±0.67 ^a		13 519.86±3.44 ^c	
	黑膜	0.44±0.04 ^a	5.56±0.12 ^a	1.13±0.08 ^a	20.26±0.48 ^a	0.82±0.10 ^a	14.69±0.49 ^a	3.62±0.16 ^a	65.05±0.82 ^b		21 942.17±1.92 ^a	
	白膜	0.35±0.04 ^b	4.73±0.14 ^b	0.84±0.03 ^b	17.82±0.83 ^a	0.66±0.10 ^b	13.97±0.25 ^a	3.23±0.13 ^{ab}	68.21±0.93 ^b		17 640.45±2.61 ^b	
2017	不覆膜	0.35±0.02 ^c	4.54±0.24 ^c	0.91±0.06 ^c	20.20±2.31 ^b	0.42±0.01 ^c	9.33±0.76 ^b	2.55±0.40 ^b	56.52±0.45 ^a		17 458.73±7.15 ^c	
	黑膜	0.55±0.01 ^a	6.71±0.15 ^a	2.82±0.06 ^a	42.07±0.86 ^a	1.07±0.08 ^a	15.99±1.06 ^a	2.81±0.70 ^a	41.95±0.24 ^b		27 785.60±3.77 ^a	
	白膜	0.49±0.02 ^b	5.73±0.06 ^b	2.26±0.07 ^b	39.42±0.84 ^a	0.85±0.02 ^b	14.84±0.42 ^a	2.62±0.10 ^b	45.73±0.52 ^b		24 553.94±8.00 ^b	

表4 产量与生长、生理性状的相关性分析
Table 4 Correlation analysis between yield and growth physiological indicators

指标	产量	株高	冠幅	蒸腾速率	净光合速率	根系活力	MDA含量	细胞膜透性	干物质积累量
产量	1.000								
株高	0.938	1.000							
冠幅	0.973	0.993 [*]	1.000						
蒸腾速率	-0.988 [*]	-0.873	-0.926	1.000					
净光合速率	0.996 [*]	0.903	0.949	-0.998 [*]	1.000				
根系活力	0.997 [*]	0.961	0.988 [*]	-0.973	0.986	1.000			
MDA含量	-0.994 [*]	-0.970	-0.992 [*]	0.966	-0.981	-1.000 ^{**}	1.000		
细胞膜透性	-0.987	-0.871	-0.924	1.000 ^{**}	-0.998 [*]	-0.972	0.964	1.000	
干物质积累量	0.990 [*]	0.878	0.930	-1.000 ^{**}	0.998 [*]	0.976	-0.968	-1.000 ^{**}	1.000

*代表相关性显著 ($P<0.05$), **代表相关性极显著 ($P<0.01$)。采用2年覆膜处理后各个生育期的平均数值进行相关性分析。

媛等2018)。聂唯等(2019)关于马铃薯的生长对不同颜色地膜覆盖的响应的试验表明, 在各个生育期, 白膜和不覆膜处理下的株高明显低于黑膜处理, 这与孟玉东和赵经华(2018)在马铃薯上的试验得到的结果一致。孙仕军等(2019)的研究结果显示, 覆盖地膜对玉米的生长进程具稳定促进的效应, 并且覆盖地膜后的玉米植株株高明显高于露地处理。代海林等(2012)的试验结果表明, 覆膜栽培能显著改善马铃薯的生长性状, 与不覆膜相比能明显提高马铃薯植株的株高、冠幅等。本试验的研究结果与前人一致, 地膜覆盖能够显著改善各个生育期马铃薯植株的株高、冠幅, 且不同处理间以黑色地膜覆盖的效果较佳。

3.2 不同地膜覆盖对马铃薯生理性状的影响

植物将光能转化成生命进程中的化学能, 进而合成有机物的过程为植物的光合作用, 作物品质改善、产量提高的本质原因就在于作物光合性能的改善。路海东等(2017)通过研究覆盖黑色地膜对旱作区玉米光合特性的影响, 结果表明相较于裸地栽培与白膜, 黑色地膜推迟了叶片的衰老时间, 对玉米功能叶片的蒸腾速率和叶片光合速率有明显的提高作用。许丽婷等(2017)的试验结果显示, 在马铃薯块茎膨大期, 覆膜种植相比于不覆膜, 叶片的 P_n 、 T_r 均有提高。陈芳等(2017)的研究表明, 与露地直播相比, 地膜覆盖下的玉米叶片在抽雄期的 T_r 、 P_n 显著提高, 两者的变化趋势均是先上升后降低。包开花等(2016)关于覆膜方式对马铃薯光合特性的研究也显示, 在整个生育期内, 马铃薯功能叶片 P_n 、 T_r 的变化呈现低-高-低的规律, 在块茎形成期有峰值, 且覆盖地膜下的 P_n 、 T_r 均比露地平播明显上升。本试验表明, 在马铃薯的各个生育阶段, 功能叶片的 P_n 、 T_r 在不同处理下的变化呈一致的趋势, 整体呈先上升后下降的趋势, 与WM和CK相比, BM处理的叶片 P_n 显著升高, 而块茎膨大期前的叶片 T_r 则是对照高于覆膜处理, 块茎膨大期后对对照明显低于覆膜处理, 这可能是由于马铃薯生长发育前期的气孔限制导致气孔导度有所下降。由此可见, 覆盖地膜措施对于马铃薯功能叶片的光合性能具有显著的促进和改善的效果, 且黑色地膜是更好的选择。

旱作区的作物生长代谢以及产量品质的首要影响成分即干旱胁迫, 根系生理特性是衡量养分、水分是否充足供应和对于干旱胁迫响应程度的直接标志(潘晓迪等2017)。同时, 作物的碳同化过程在干旱胁迫下会受阻, 使细胞体内的过氧化氢和 $O_2^{\cdot-}$ 等的含量过高而不能及时被分解, 导致膜系统的稳定态被打破, 进而膜脂的过氧化被加剧分解产物为MDA, 其含量也能够作为衡量作物受逆境胁迫的标志(Plazas等2019)。质膜变化与叶片的MDA含量成正比, 因此细胞膜透性也是反映作物抗旱响应的重要指标。宋海星和李生秀(2006)关于覆膜对冬小麦根系生理的研究结果显示, 在覆膜条件下, 冬小麦植株根系活力较不覆膜有所增强, 覆膜能够促进根系的生长。侯贤清等(2020)的试验结果表明, 相比于不覆膜, 覆盖地膜后马铃薯功能叶片的MDA含量较低, 正常维持马铃薯植株生长代谢, 这与王颖慧等(2012)关于覆膜对旱作区马铃薯生理特性影响的研究结果一致。李倩等(2010)的试验结果显示, 采用覆膜处理能够降低旱作区马铃薯叶片的MDA含量和细胞膜透性, 进而达到显著增产的效益。本研究的结果与前人一致, 经过2年试验, 覆盖地膜措施对马铃薯植株生理指标有显著的影响, 在马铃薯整个生育期内, 不同覆膜处理相较于不覆膜均能明显增强植株根系活力, 降低功能叶片的细胞膜透性和MDA含量, 并且黑色地膜的效果更佳。这可能是由于覆膜处理能够改善土壤的水分情况, 从而使植株受水分胁迫的限制减轻, 膜系统破坏程度减少, 马铃薯生长代谢恢复正常。

3.3 不同地膜覆盖对马铃薯干物质积累的影响

2年试验表明, 覆膜栽培模式下, 各个生育阶段马铃薯叶、地上茎以及块茎的积累量均比不覆膜处理高, 且相比于WM处理, BM处理下各器官干物质积累量的增加幅度更大。这与任莉萍(2017)的研究结果一致, 在马铃薯的生长期, 覆膜条件下的马铃薯各器官干物质质量显著高于不覆膜栽培, 且黑膜处理比白膜处理对马铃薯干物质积累的影响更加显著。张平良等(2017)的试验结果发现, 覆膜种植的马铃薯地下块茎量较裸地种植显著提高43.4%~60.7%。周东亮等(2018)的研究结果表明,

与露地垄作相比,双垄沟播黑膜覆盖的马铃薯全株干物质的积累量显著增加,且在块茎形成期的增加幅度最大,谭雪莲等(2011)的研究也有类似的结论。综上所述,黑色地膜覆盖能更好地保障马铃薯不同器官干物质的积累,为增产增效奠定稳固的物质基础。

3.4 不同地膜覆盖对马铃薯产量及构成因素的影响

张立功和马淑珍(2014)研究认为,全膜覆盖对马铃薯的增产效益显著,大薯、中薯重较露地提高23.63%、鲜薯提高21.2%。黄凯等(2017)关于马铃薯产量对不同覆膜措施的响应的研究得出,覆膜处理促进马铃薯块茎有机物合成、积累,增加了单株的生物学产量,同时有效降低了绿薯率,提高了大薯数与大薯率,不同膜色之间的增产顺序为黑色地膜>白色地膜>对照。王颖慧等(2012)的试验表明,不同的覆膜方式均能使旱作区马铃薯达到增效增产的效果,能显著提高单株薯重、单株薯数以及单株产量。王鑫等(2017)研究认为,黑色全膜覆盖提高马铃薯田间长势,单位面积产量较露地种植提高10 558.50 kg。本试验结果显示,马铃薯产量以及产量构成因素对覆膜处理的响应显著,综合2年试验结果可知,覆膜处理下的大、中薯率显著提高,BM处理较WM和CK处理的整体增产效应更强。

综上所述,干旱胁迫是限制宁夏南部山区马铃薯产业发展的根本因素,覆膜技术的发展和运用,不仅有效调控了土壤水温效应,同时降低无效蒸发,增强马铃薯的抗旱保苗能力,成为高效增产的农业措施。本研究中,2年试验期内的结果表明,覆盖地膜对各生育期内马铃薯的生长代谢的调控较不覆膜处理效果更佳,有效降低叶片蒸腾速率,功能叶片的细胞膜透性、MDA含量,使植株延缓衰老并增强马铃薯的抗逆性,生长指标(植株株高、冠幅)、叶片净光合速率、植株根系活力均显著提高,同时不同地膜都显著增加了马铃薯的各器官干物质积累量,提高大薯和中薯率,达到优质高产的宗旨。综合考量各项指标,不同膜色地膜之间,黑色地膜更有利于马铃薯的生长代谢,对马铃薯的生长、生理特性以及产量性状都有不同程度的改善,因此该高效栽培模式对于宁夏半干旱农作区具有的关键性的应用和推广价值。

参考文献(References)

- Bao KH, Meng ML, Chen YJ, et al (2016). Effects of plastic film mulching patterns and water retaining agent on photosynthetic characteristics and yield of rainfed potato. *Agric Res Arid Areas*, 34 (3): 139–143, 159 (in Chinese with English abstract) [包开花, 蒙美莲, 陈有君等(2016). 覆膜方式和保水剂对旱作马铃薯光合特性及产量的影响. *干旱地区农业研究*, 34 (3): 139–143, 159]
- Chen F, Gu XP, Yu F, et al (2017). Effect of different cultivation methods on photosynthetic characteristics and yield of maize. *Chin Agric Sci Bull*, 33 (10): 23–30 (in Chinese with English abstract) [陈芳, 谷晓平, 于飞等(2017). 不同栽培方式对玉米光合特性及产量的影响. *中国农学通报*, 33 (10): 23–30]
- Dai HL, Qin SH, Zhang JL, et al (2012). Effects of plastic film and ridge-furrow cropping patterns on growth and yield of potato in semiarid areas. *Agric Res Arid Areas*, 30 (5): 56–60 (in Chinese with English abstract) [代海林, 秦舒浩, 张俊莲等(2012). 沟垄覆膜栽培对旱作马铃薯生长及产量的影响. *干旱地区农业研究*, 30 (5): 56–60]
- Gao SM, Zhang XC, Wang YH (2010). Influence of different mulching and furrow-ridge planting methods on soil moisture and yield of potato on dryland. *J Soil Water Conserv*, 24 (1): 249–251 (in Chinese with English abstract) [高世铭, 张绪成, 王亚宏(2010). 旱地不同覆盖沟垄种植方式对马铃薯土壤水分和产量的影响. *水土保持学报*, 24 (1): 249–251]
- Hou XQ, Li R (2015). Effects of mulching with no-tillage on soil physical properties and potato yield in mountain area of southern Ningxia. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 31 (19): 112–119 (in Chinese with English abstract) [侯贤清, 李荣(2015). 免耕覆盖对宁南山区土壤物理性状及马铃薯产量的影响. *农业工程学报*, 31 (19): 112–119]
- Hou XQ, Li R, Ma F, et al (2020). Effects of tillage with mulching during fallow period on physiological ecology in seedling stage and yield of potato in dry-farming areas. *Trans Chin Soc Agric Mac*, 1–14 (7): (in Chinese with English abstract) [侯贤清, 李荣, 马菲等(2020). 休闲期耕作覆盖对马铃薯苗期生理生态与产量的影响. *农业机械学报*, (7): 1–14]
- Hu TT, Kang SZ (2005). The compensatory effect in drought resistance of plants and its application in water-saving agriculture. *Acta Ecol Sin*, (4): 885–891 (in Chinese with English abstract) [胡田田, 康绍忠(2005). 植物抗旱性中的补偿效应及其在农业节水中的应用. *生态学报*, (4): 885–891]
- Huang K, He XQ, Li DM, et al (2017). Effects of different mulching methods on characteristics of growth, yield and quality for potato in semi-arid area of Longzhong. *Chin Potato J*, 31 (5): 272–277 (in Chinese with English ab-

- stract) [黄凯, 何小谦, 李德明等(2017). 陇中半干旱区不同覆盖方式对马铃薯生长指标、产量及品质的影响. 中国马铃薯, 31 (5): 272–277]
- Jiang R, Guo S, Ma DD (2018). Review of plastic film mulching system and its impact on soil ecological environment in China's rainfed drylands. *Chin J Eco-Agric.*, 26 (3): 317–328 (in Chinese with English abstract) [蒋锐, 郭升, 马德帝(2018). 旱地雨养农业覆膜体系及其土壤生态环境效应. 中国生态农业学报, 26 (3): 317–328]
- Lei J, Zhang K, Yao YB, et al (2017). Effects of black plastic film mulching on photosynthetic characteristics and yield of potato in semi-arid region. *J Arid Meteor.*, 35 (6): 1036–1041 (in Chinese with English abstract) [雷俊, 张凯, 姚玉璧等(2017). 半干旱区黑膜覆盖对马铃薯光合特性及产量的影响. 干旱气象, 35 (6): 1036–1041]
- Li Q, Liu JH, Zhang L, et al (2010). Effect of mulch and water absorbent on morphological characters and membrane permeability of potato. *Agric Res Arid Areas*, 28 (6): 177–182 (in Chinese with English abstract) [李倩, 刘景辉, 张磊等(2010). 覆盖和保水剂对马铃薯的形态特征和质膜透性的影响. 干旱地区农业研究, 28 (6): 177–182]
- Li XN, Dong SK, Liu LJ, et al (2016). Effect of drought stress on SOD activity and MDA content of spring soybean. *Chin Agric Sci Bull*, 32 (15): 93–97 (in Chinese with English abstract) [李雪凝, 董守坤, 刘丽君等(2016). 干旱胁迫对春大豆超氧化物歧化酶活性和丙二醛含量的影响. 中国农学通报, 32 (15): 93–97]
- Liu CA, Jin SL, Zhou LM, et al (2009). Effects of plastic film mulch and tillage on maize productivity and soil parameters. *Eur J Agron*, 31 (4): 241–249
- Lu HD, Xue JQ, Guo DW, et al (2017). Effects of black plastic film mulching on soil temperature and humidity in root zone and photosynthetic characteristics of rainfed maize. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 33 (5): 129–135 (in Chinese with English abstract) [路海东, 薛吉全, 郭东伟等(2017). 覆黑地膜对旱作玉米根区土壤温湿度和光合特性的影响. 农业工程学报, 33 (5): 129–135]
- Lu XF (1977). The root activity of rice was determined by the injured fluid. *Bull Agric Sci Tech*, (9): 19 (in Chinese) [卢贤丰(1977). 测定伤流液诊断水稻根系活力. 农业科技通讯, (9): 19]
- Lv WH, Ma ZJ, Li Y, et al (2014). Comparison for total and marketable tuber yield of advanced clones selected from potato 4x-4x and 4x-2x crosses. *J Northeast Agric Univ*, 45 (10): 1–9 (in Chinese with English abstract) [吕文河, 马子竣, 李莹等(2014). 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. 东北农业大学学报, 45 (10): 1–9]
- Meng YD, Zhao JH (2018). Effect of different color film on growth index of drip irrigation potato. *Chin Agric Sci Eng*, 30 (3): 78–79 (in Chinese) [孟玉东, 赵经华(2018). 不同颜色薄膜对滴灌马铃薯生长指标的影响. 中国农业文摘-农业工程, 30 (3): 78–79]
- Nie W, Wang FX, Han JJ, et al (2019). Film with different colors affecting soil temperature, potato growth and yield. *Chin Agric Sci Bull*, 35 (2): 5–13 (in Chinese with English abstract) [聂唯, 王凤新, 韩江江等(2019). 不同颜色覆膜对土壤温度、马铃薯生长发育及产量的影响. 中国农学通报, 35 (2): 5–13]
- Pan XD, Zhang Y, Shao M, et al (2017). Research progress on adaptive responses of crop root structure to drought stress. *J Agric Sci Tech*, 19 (2): 51–58 (in Chinese with English abstract) [潘晓迪, 张颖, 邵萌等(2017). 作物根系结构对干旱胁迫的适应性研究进展. 中国农业科技导报, 19 (2): 51–58]
- Plazas M, Nguyen HT, González-Orenga S, et al (2019). Comparative analysis of the responses to water stress in eggplant (*Solanum melongena*) cultivars. *Plant Physiol Biochem*, 143: 72–82
- Ren LP (2017). Effects of different mulching methods on dry matter accumulation of potato in dryland areas. *Sci Tech Inform Gansu*, 46 (9): 44–46 (in Chinese) [任莉萍(2017). 旱作区不同覆盖方式对马铃薯干物质累积的影响. 甘肃科技纵横, 46 (9): 44–46]
- Song HX, Li SX (2006). The physiological characteristics of winter wheat roots and its spatial distribution under mulching plastic film condition. *Agric Res Arid Areas*, (6): 1–6 (in Chinese with English abstract) [宋海星, 李生秀(2006). 覆膜条件下冬小麦根系生理特性及其空间分布变化. 干旱地区农业研究, (6): 1–6]
- Sun MY, Liu JH, Zhao BP, et al (2018). Effects of whole plastic film mulching ridging cropping patterns on soil thermal-moisture status, soil enzyme activity and yield of rain fed potato. *J Arid Res Envir*, 2 (1): 133–139 (in Chinese with English abstract) [孙梦媛, 刘景辉, 赵宝平等(2018). 全膜垄作栽培对旱作马铃薯产量及土壤水热和酶活性的影响. 干旱区资源与环境, 2 (1): 133–139]
- Sun SJ, Zhang WW, Liu CH, et al (2019). Degradation property of oxo-biodegradable plastic film and its mulching effect on soil moisture, soil temperature and maize growth in rainfed Northeast China. *Chin J Eco-Agric*, 27 (1): 72–80 (in Chinese with English abstract) [孙仕军, 张旺旺, 刘翠红等(2019). 氧化生物双降解地膜降解性能及其对东北雨养春玉米田间水热和生长的影响. 中国生态农业学报, 27 (1): 72–80]
- Tan XL, Lv JF, Guo TW, et al (2011). Effects of plastic film mulching and fertilization on potato dry matter accumulation and soil water content in dryland. *J Irriga Dra*, 30 (2): 104–106, 126 (in Chinese with English abstract) [谭雪莲,

- 吕军锋, 郭天文等(2011). 旱地地膜覆盖和施肥对马铃薯干物质累积和土壤水分含量的影响. 灌溉排水学报, 30 (2): 104–106, 126]
- Tian DZ, Jiang WB (2005). High yield cultivation technique of spring sowing groundnut with plastic film. *Mod Agri Sci Tech*, (12): 42 (in Chinese) [田德珍, 姜未罢(2005). 春播地膜花生高产栽培技术. 现代农业科技, (12): 42]
- Wang CG, Shui JB (2010). Experimental study on drought resistance and yield increase of potato with different mulching techniques. *Inform Agric Sci Tech*, (21): 18 (in Chinese) [王成刚, 水建兵(2010). 马铃薯不同地膜覆盖技术抗旱增产效果试验研究. 农业科技与信息, (21): 18]
- Wang HL, Zhang XC, Yu XF, et al (2016). Effect of using black plastic film as mulch on soil temperature and moisture and potato yield. *Acta Ecol Sin*, 36 (16): 5215–5226 (in Chinese with English abstract) [王红丽, 张绪成, 于显枫等(2016). 黑色地膜覆盖的土壤水热效应及其对马铃薯产量的影响. 生态学报, 36 (16): 5215–5226]
- Wang X, Zhang T, Li SJ, et al (2017). Experimental study on increasing yield and efficiency of mechanical potato planting with whole black film mulching technology. *J Chin Agric Mecha*, 38 (6): 89–93 (in Chinese with English abstract) [王鑫, 张涛, 李树杰等(2017). 黑色全膜覆土马铃薯机械种植增产增效试验研究. 中国农机化学报, 38 (6): 89–93]
- Wang YH, Meng ML, Zhang J, et al (2012). Effects of different film-covering modes on physiological indexes of potato on dryland tillage. *Chin Potato J*, 26 (6): 336–340 (in Chinese with English abstract) [王颖慧, 蒙美莲, 张静等(2012). 覆膜方式对旱作马铃薯若干生理指标的影响. 中国马铃薯, 26 (6): 336–340]
- Wu JR, Kang JH, Liu QJ, et al (2019). Effects of black plastic film mulching on starch accumulation and key enzyme activities of potato tubers in dryland. *Acta Agric Nucl Sin*, 33 (12): 2482–2491 (in Chinese with English abstract) [吴佳瑞, 康建宏, 柳强娟等(2019). 黑膜覆盖对旱地马铃薯块茎淀粉积累和关键酶活性的影响. 核农学报, 33 (12): 2482–2491]
- Xu LT, Qi R, Qin SH, et al (2017). Effects of film mulching and ridge-furrow planting in continuous cropping on eco-physiological characteristics and yield of potato. *J Gansu Agric Univ*, 52 (6): 26–32 (in Chinese with English abstract) [许丽婷, 齐荣, 秦舒浩等(2017). 沟垄覆膜连作对马铃薯植株生理生态特性及产量的影响. 甘肃农业大学学报, 52 (6): 26–32]
- Xue JW (2014). Effect of plastic film mulching on soil moisture and potato in *Loess plateau* (dissertation). Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese with English abstract) [薛俊武(2014). 不同覆膜方式对旱地土壤水分及马铃薯的影响(学位论文). 北京: 中国农业科学院]
- Zhang LG, Ma SZ (2014). Research on the key technologies of whole plastic-film mulching of potato in loess hilly region. *Agric Res Arid Areas*, 32 (5): 84–92 (in Chinese with English abstract) [张立功, 马淑珍(2014). 黄土丘陵区(庄浪)旱作马铃薯全膜覆盖关键技术集成研究. 干旱地区农业研究, 32 (5): 84–92]
- Zhang PL, Guo TW, Li ST, et al (2017). Effects of different coverage cultivation and balanced fertilization on yield and water use efficiency of potato in the dryland. *Agric Res Arid Areas*, 35 (1): 50–54 (in Chinese with English abstract) [张平良, 郭天文, 李书田等(2017). 不同覆盖种植方式与平衡施肥对马铃薯产量及水分利用效率的影响. 干旱地区农业研究, 35 (1): 50–54]
- Zhang XY, Guo HC (2004). Research progress on the correlation between potato starch content and growth characteristics. *Crops*, (1): 48–50 (in Chinese) [张新永, 郭华春(2004). 马铃薯淀粉含量与生长特性相关性的研究进展. 作物杂志, (1): 48–50]
- Zhou DL, Ye BX, Wang JM, et al (2018). Effects of black plastic film mulch on potato dry matter content and water use efficiency. *China Veget*, (2): 47–52 (in Chinese with English abstract) [周东亮, 叶丙鑫, 王姣敏等(2018). 黑色地膜双垄覆盖对马铃薯干物质和水分利用效率的影响. 中国蔬菜, (2): 47–52]
- Zou Q (2007). *Experimental Instruction in Plant Physiology*. Beijing: China Agricultural Press (in Chinese) [邹琦(2007). 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社]