

覆盖作物对陇中旱农区马铃薯 农田水分利用特征的影响

付永柯^{1,2}, 李玲玲^{1,2}, 谢军红^{1,2}, 王林林^{1,2}, 张元红^{1,2}, 魏巧俏^{1,2}

(1. 干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:于2023年设置马铃薯垄沟覆盖作物种类及播期的大田试验,设置5个处理:马铃薯播前两周播种箭筈豌豆(PV1)、与马铃薯同期播种箭筈豌豆(PV2)、马铃薯播前两周播种毛叶苕子(PM1)、与马铃薯同期播种毛叶苕子(PM2)、单作马铃薯(P),研究不同覆盖作物及播期对马铃薯的农田土壤水分、耗水量、蒸发蒸腾、产量和水分利用效率的影响。结果表明:(1)与P处理相比,各覆盖处理均能不同程度增加马铃薯全生育期尤其是花后(覆盖作物刈割后)田间0~110 cm 土层土壤含水量,且毛叶苕子覆盖处理对土壤水分的提升效果优于箭筈豌豆;PM1处理能显著提高块茎膨大期田间0~110 cm 土层土壤贮水量,较P处理提高7.78%。(2)与P处理相比,各覆盖处理均能不同程度降低马铃薯全生育期的棵间蒸发量、蒸发与蒸散比和耗水量,其中PM1处理马铃薯全生育期棵间蒸发量和蒸发与蒸散比降幅最大,分别显著降低29.64%和25.66%;与P处理相比,PM1处理马铃薯花前(覆盖作物生长期)的蒸腾量显著提高9.67%,但耗水量无显著变化,覆盖作物刈割后,各覆盖处理耗水量均显著低于P处理,降幅为5.85%~16.64%。(3)PM1处理块茎产量、商品薯率和水分利用效率分别较其余处理显著提高8.89%~35.95%、17.10%~49.98%和8.87%~43.75%。因此,马铃薯播前两周垄沟播种毛叶苕子且刈割后覆盖在垄沟可为马铃薯块茎膨大期提供水分保障,同时优化耗水结构,从而提高马铃薯产量和水分利用效率,保障陇中旱农区马铃薯稳产高产。

关键词:马铃薯;覆盖作物;农田耗水量;耗水结构;水分利用效率;产量

中图分类号:S532; S152.7⁺5 **文献标志码:**A

Effects of cover crops on water use characteristics in potato fields of the Longzhong dry farming region, Gansu province

FU Yongke^{1,2}, LI Lingling^{1,2}, XIE Junhong^{1,2},

WANG Linlin^{1,2}, ZHANG Yuanhong^{1,2}, WEI Qiaoqiao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Arid Land Crop Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: A field experiment was conducted in 2023 to identify suitable cover crops and their optimal sowing periods for potatoes grown in furrows. The experiment included five treatments: sowing *Vicia sativa* two weeks before potato planting (PV1), sowing *Vicia sativa* concurrently with potato planting (PV2), sowing hairy vetch two weeks before potato planting (PM1), sowing hairy vetch concurrently with potato planting (PM2), and a potato monoculture as the control (P). The study examined the effects of different cover crops and sowing periods on soil moisture, water consumption, evapotranspiration, potato yield, and water use efficiency in field conditions. The results indicate that: (1) Each covering treatment increased the soil moisture content of the 0~110 cm soil layer in the field, throughout the growth period especially after potato flowering (after cutting cover crops) to varying degrees compared with the P treatment. The effect of the hairy vetch treatment was better than that of the *Vicia sativa* treatment. Moreover, PM1 treatment significantly increased the soil moisture storage in the 0~110 cm soil layer during the tuber expansion period, which was 7.78% higher than the P treatment. (2) The covering treatment re-

duced potatoes' soil evaporation, E/ET , and water consumption to varying degrees throughout the growth period of potatoes over P treatment. The PM1 treatment had the best effect on reducing soil evaporation and the E/ET during the whole growth period of potatoes, significantly lower than the P treatment by 29.64% and 25.66%, respectively as compared to P treatment. Pre-potato flowering (the growth period of cover crops), the transpiration of PM1 treatment was significantly higher than P treatment by 9.67%, but there was no significant difference in water consumption between these two treatments. After cutting cover crops, the water consumption of each covering treatment was significantly lower than P treatment by 5.85%~16.64%. (3) The potato yield, commercial potato rate and water use efficiency of PM1 were significantly higher than other treatments by 8.89%~35.95%, 17.10%~49.98%, and 8.87%~43.75%, respectively. Therefore, sowing hairy vetch in furrows and covering it with cuttings two weeks before planting potatoes can ensure adequate water supply during the tuber expansion period, optimize water consumption patterns, improve potato yield and water use efficiency, and promote stable, high yields in the arid agricultural regions of central Gansu.

Keywords: potato; cover crop; farmland water consumption; water consumption structure; water use efficiency; yield

马铃薯作为全球第三大人类直接消费的粮食作物,因其具有耐寒旱、耐贫瘠和适应性广等特点,已成为干旱少雨、传统粮食作物发展困难的陇中旱农区的优势作物,其产量高低与稳定生产对保障地区粮食安全和农业增收具有重要意义^[1-3]。陇中旱农区是典型的半干旱雨养农业区,因降水有限,无效蒸发损失严重^[4],水分成为该区马铃薯稳产高产的主要限制因子。提高水分利用效率是保障该区马铃薯稳产高产的重要举措^[5-6]。研究表明,相较于平作,起垄种植结合垄上覆膜可显著提高旱区马铃薯产量和水分利用效率^[7-8],是当前陇中旱农区马铃薯生产的主要栽培模式。垄上覆膜后,垄沟便成为田间土壤水分与大气交换的主要界面,其土壤水分入渗性能的改善与蒸发能力的平衡可有效提升马铃薯水分利用效率。

合理种植覆盖作物能通过改善土壤结构和避免表土直接被雨水冲刷促进降水入渗;同时覆盖遮蔽能调节土壤温度,有效降低土壤水分无效蒸发^[9-11]。但覆盖作物生长期耗水与主栽作物存在水分竞争^[12],种植覆盖作物能否提高主栽作物的水分利用效率,取决于覆盖作物和主栽作物的搭配及其播种时间^[9]。豆科覆盖作物具有耗水量低^[13]、生长迅速和增加主栽作物氮素供应等特征^[9]。Gitari等^[14]在半湿润区的研究发现,垄间种植扁豆有利于马铃薯稳产和水分利用效率提升,而种植豌豆和菜豆则降低了马铃薯产量和水分利用效率;这可能与扁豆具有更高的地表覆盖度和二者水分竞争更少有关。李含婷等^[15]在绿洲灌区的研究表明,玉米播前行间种植箭筈豌豆较种植油菜能更好地减少土壤水分无效蒸发,降低总耗水量,从而提高玉米水

分利用效率。覆盖作物的播期能够决定其刈割期及与主栽作物共生期。张绪成等^[13]对半干旱区马铃薯垄沟种植不同播期箭筈豌豆的研究表明,在6—7月(块茎形成期前后)种植箭筈豌豆对马铃薯产量和水分利用效率提升效果不佳甚至造成减产。Ren等^[16]研究发现,行间同期种植毛野豌豆能够提升半干旱区马铃薯的水分利用效率,这与二者在水分利用上互补有关。

当前关于不同覆盖作物及其不同播期对主栽作物产量和水分利用效率的影响已有研究,但在陇中旱农区马铃薯生产中适宜的覆盖作物及其播期尚不明确,不同覆盖作物配合不同播期对马铃薯水分利用效率影响机制的研究亦不多见。因此,本研究选择箭筈豌豆(*Vicia sativa* L.)和毛叶苕子(*Vicia villosa* Roth)作为马铃薯农田的覆盖作物,通过设置不同播期,研究覆盖作物及其播期对马铃薯田间水分利用特征、产量和水分利用效率的影响,以期筛选合理的覆盖作物及播期,并探讨其作用机制,为陇中旱农区马铃薯稳产高产高效的生产模式提供理论参考和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2023年在甘肃农业大学旱作农业综合实验站(35°28'N,104°44'E,海拔1971 m)进行,该地区位于黄土高原西部,属中温带半干旱偏旱区,多年平均日照时长2476.6 h,太阳辐射量为592.9 KJ·cm⁻²;年均气温6.4℃,≥0℃积温为2933.5℃,≥10℃有效积温为2239.1℃,年均无霜期约140 d;多年平均降水量为391 mm,年际、年内降水的变化率

大,80%保证率的降水量为 365 mm,年潜在蒸发量为 1 531 mm,变异系数为24.3%。试区作物种植制度为一年一熟制,为典型的半干旱雨养农业区。4—10月多年平均降水量为 364.0 mm,2023年4—10月降水量为 370.7 mm(图 1),属平水年;马铃薯生育时期有效降水量(≥ 5 mm)为 248.9 mm。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,设 5 个处理:马铃薯播前两周播种箭筈豌豆(PV1)、马铃薯同期播种箭筈豌豆(PV2)、马铃薯播前两周播种毛叶苕子(PM1)、马铃薯同期播种毛叶苕子(PM2)、马铃薯单作(对照,P)。各处理设 3 次重复,共 15 个小区,小区面积为 42 m²(6 m×7 m)。

供试马铃薯品种为‘陇薯 10 号’,于 2023 年 4 月 27 日播种,10 月 7 日收获,采用垄上种植,一垄两行,平均行距 50 cm,株距 33 cm,种植密度为 6.0 万株·hm⁻²。覆盖作物播种于马铃薯垄沟,每沟两行,行距均为 20 cm,与马铃薯行间距为 15 cm。于覆盖作物盛花期将覆盖作物刈割,并整株覆盖于马铃薯垄沟。在 PV1 和 PM1 处理覆盖作物播前,各小区均匀撒施肥料于地表并深耕起垄覆黑色地膜(膜宽 90 cm、厚 0.01 mm),其中垄宽 60 cm,垄高 20 cm,沟宽 40 cm。各处理施肥量保持一致:纯氮 200 kg·hm⁻²,纯磷 150 kg·hm⁻²,供试氮肥为尿素(含氮量:46%),供试磷肥为过磷酸钙(含磷量:12%)。马铃薯生育时期内不灌水,人工除草,各处理具体设置及操作时间如表 1 所示。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 田间土壤含水量 于马铃薯播前、出苗、苗期、花期、块茎膨大期、淀粉积累期、成熟期及覆盖作物刈割期,各小区分别取 0~5、5~10、10~30、30~50、50~80、80~110 cm 土层土样,采用烘干法测定

0~110 cm 深度土壤含水量,取样位置均于马铃薯垄上种植行间和垄沟中央两处,田间土壤水分以垄上 60%和垄沟 40%加权平均值表示^[17]。

1.3.2 田间裸间蒸发量 各小区分别安装一个 PVC 管自制微型蒸发器(高 15 cm,内径 11 cm)^[18],测定田间裸间蒸发量,每日 18:00 于马铃薯垄沟中央取原状土用保鲜膜封底,用电子天平(精度 0.01 g)称重,然后置于原位使其表面与周围土壤持平,次日 18:00 称重一次,微型蒸发器中土样重量每减少 1 g 相当于蒸发水分 0.1051 mm。每三天换一次土,雨后立即换土。由于垄上覆膜,其裸间蒸发量相对于垄沟极其微小可以忽略,田间裸间蒸发量主要由垄沟产生,因此各小区日平均裸间蒸发量计为垄沟测定蒸发值的 40%^[19]。

1.3.3 田间土壤贮水量与耗水量 土壤贮水量(SWS, mm)计算公式如下:

$$SWS = 10 \times h \times d \times \theta \quad (1)$$

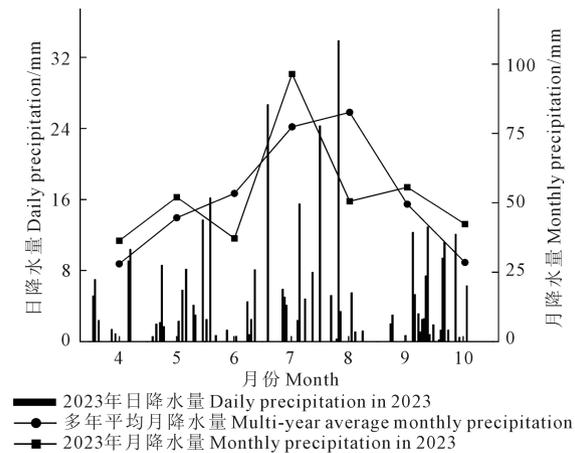


图 1 试验区多年平均月降水量与 2023 年马铃薯生育时期降水量

Fig.1 Multi-year average monthly precipitation and precipitation of potato growth stage in 2023 in the test area

表 1 各处理具体设置及操作时间
Table 1 Specific settings and operation time for each treatment

处理 Treatment	覆盖作物 Cover crop	覆盖作物品种 Variety of cover crops	覆盖作物播量 Sowing amount of cover crops (kg·hm ⁻²)	覆盖作物播期 Sowing period of cover crops (y-m-d)	覆盖作物刈割期 Cutting period of cover crops (y-m-d)	马铃薯花期 Potato flowering period (y-m-d)
P						2023-07-15
PV1	箭筈豌豆 Vicia sativa	兰箭 3 号 Lanjian 3	225	2023-04-13	2023-07-06	2023-07-15
PV2	箭筈豌豆 Vicia sativa	兰箭 3 号 Lanjian 3	225	2023-04-27	2023-07-15	2023-07-15
PM1	毛叶苕子 Hairy vetch	土库曼 Tukuman	45	2023-04-13	2023-07-06	2023-07-15
PM2	毛叶苕子 Hairy vetch	土库曼 Tukuman	45	2023-04-27	2023-07-15	2023-07-15

式中, h 代表土层深度(cm); d 代表土壤容重($g \cdot cm^{-3}$); θ 代表土壤质量含水量;10为单位换算系数。0~110 cm 土层土壤贮水量为各层次贮水量之和。

田间耗水量(ET , mm)计算公式如下:

$$ET = P + SWS_1 - SWS_2 \quad (2)$$

式中, P 为时段内有效降水量(mm); SWS_1 和 SWS_2 分别为某一生育阶段初与末0~110 cm 土层土壤贮水量(mm)。

1.3.4 作物蒸腾量与田间耗水结构 作物蒸腾量(T , mm)计算公式如下:

$$T = ET - E \quad (3)$$

式中, ET 为田间耗水量(mm); E 为棵间蒸发量(mm)。

蒸发与蒸散比(E/ET ,%)为棵间蒸发量(E)与田间耗水量(ET)的比值。

1.3.5 马铃薯块茎产量和水分利用效率 马铃薯收获时每小区随机取15株进行考种,按商品薯分级标准(单薯质量>50 g)计算商品薯率;并按小区测产,以3次重复平均值折算为公顷产量。水分利用效率(WUE , $kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$)计算公式如下:

$$WUE = TY/ET \quad (4)$$

式中, TY 为块茎产量($kg \cdot hm^{-2}$); ET 为马铃薯全生育期间耗水量(mm)。

1.4 数据处理

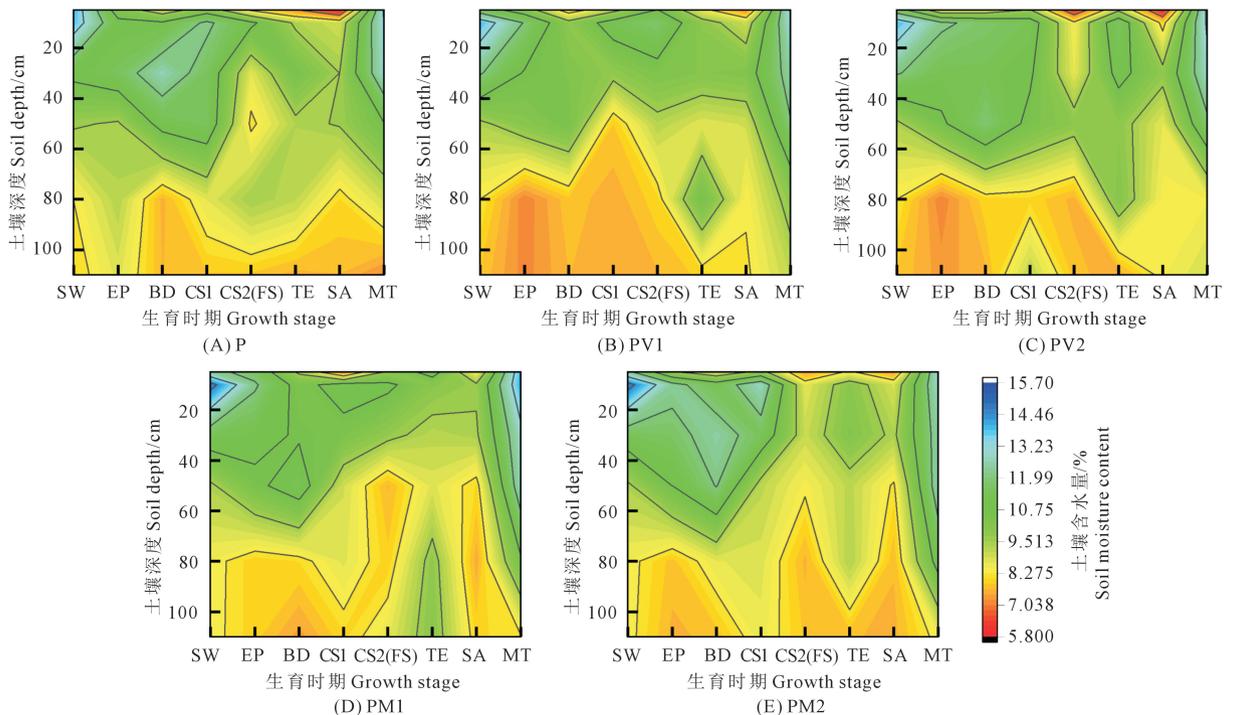
试验数据采用 Excel 2016 软件整理汇总,用 SPSS 26.0 软件进行方差分析, Duncan 法进行多重比较($P < 0.05$),用 Sigmaplot 14 和 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 覆盖作物对马铃薯田间土壤水分的影响

2.1.1 覆盖作物对马铃薯田间土壤含水量和水分时空分布的影响 由图2可知,随着马铃薯生育时期推进,同种覆盖作物处理下的土壤含水量变化趋势相似。在马铃薯全生育期,各处理土壤含水量总体呈现出花后低于花前的趋势,且毛叶苕子覆盖处理相比箭筈豌豆覆盖处理能保持较高的土壤含水量。

覆盖处理能较对照不同程度提升马铃薯花后和全生育期田间0~110 cm 土层平均土壤含水量(图3)。在马铃薯花前,PV2、PM1 和 PM2 处理0~

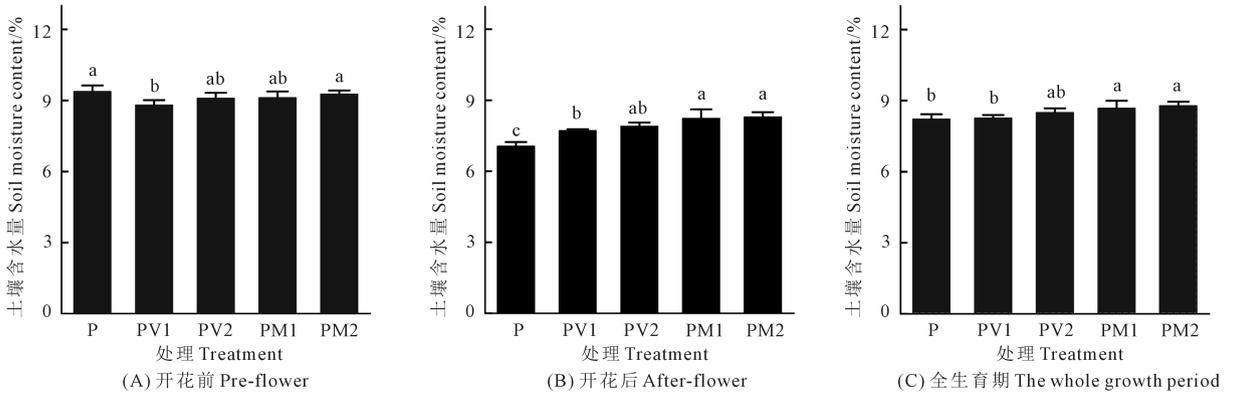


注:CS1、CS2 分别代表 PV1 和 PM1 处理及 PV2 和 PM2 处理覆盖作物刈割期;SW、EP、BD、FS、TE、SA 和 MT 分别代表马铃薯播前、出苗、苗期、花期、块茎膨大期、淀粉积累期和成熟期。下同。

Note:CS1 and CS2 represent the cutting periods of PV1 with PM1 and PV2 with PM2, respectively, while SW, EP, BD, TF, TE, SA, and MT represent the sowing, emergence, seedling, flowering stage, tuber enlargement, starch accumulation, and maturity periods of potatoes, respectively. The same below.

图2 不同处理下马铃薯全生育期田间0~110 cm 土层土壤水分时空分布

Fig.2 Spatiotemporal distribution of soil moisture in the 0~110 cm layer during the whole growth period of potato under different treatments



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),图中垂直误差棒代表标准差。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$), and the vertical error bar in the figure represents the standard deviation. The same below.

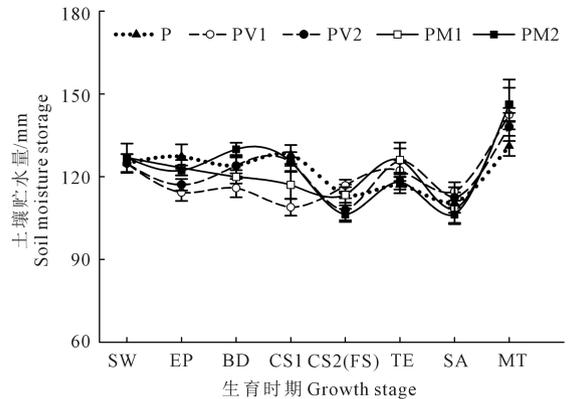
图 3 不同处理下马铃薯全生育期间 0~110 cm 土层平均土壤含水量

Fig.3 Average soil moisture content in the 0~110 cm layer during the whole growth period of potato under different treatments

110 cm 土层平均土壤含水量与 P 处理无显著差异, PV1 处理则较 P 处理显著降低。在马铃薯花后, PM1 和 PM2 处理 0~110 cm 土层的平均土壤含水量最高,分别较 P 处理显著提高 16.63%和 17.49%。从马铃薯全生育期 0~110 cm 土层平均土壤含水量来看,PM1 和 PM2 处理均显著高于 P 处理,增幅为 5.56%~6.85%;PV1 和 PV2 处理与 P 处理之间则无显著差异。马铃薯全生育期,毛叶苕子覆盖处理田间 0~110 cm 土层平均土壤含水量整体上高于箭筈豌豆,表明其蓄水保墒效果优于箭筈豌豆。

2.1.2 覆盖作物对马铃薯田间土壤贮水量动态变化的影响 随着马铃薯生育时期推进,各处理 0~110 cm 土层土壤贮水量总体上呈先降后升再降,最后在成熟期升高的趋势;在覆盖作物生长期,相同播期覆盖处理的土壤贮水量表现出相似变化趋势(图 4)。

在提前播种覆盖处理的刈割期(CS1),PV1 和 PM1 处理土壤贮水量显著低于 P 处理,且 PM1 较 PV1 处理显著提高 7.48%,而 PV2 和 PM2 处理较 P 处理无显著变化;在同期播种覆盖处理刈割期(马铃薯花期),PV1 和 PM1 处理土壤贮水量与 P 处理无显著差异,PV2 较 P 处理降低 4.86%,PM2 处理较 P 处理显著降低 6.29%;马铃薯块茎膨大期,覆盖处理土壤贮水量均高于 P 处理,其中以 PM1 处理最高,较 P 处理显著提高 7.78%;马铃薯块茎膨大期~淀粉积累期,各处理土壤贮水量均有不同程度下降,以 PM1 处理降幅最大(14.29%);马铃薯成熟期,各覆盖处理土壤贮水量均不同程度高于 P 处理,PM1 和 PM2 处理的增幅高于 PV1 和 PV2 处理。



注:不同竖直线短表示 0.05 水平上的最小显著性差异值。

Note: Vertical bars indicate the least significant difference value at $P < 0.05$.

图 4 不同处理下马铃薯全生育期间 0~110 cm 土层土壤贮水量动态变化

Fig.4 Dynamic changes in soil moisture storage of 0~110 cm layer during the whole growth period of potato under different treatments

与单作马铃薯相比,覆盖处理能够不同程度提升马铃薯块茎膨大期土壤贮水量,以提前两周播种毛叶苕子覆盖处理效果最优。

2.2 覆盖作物对马铃薯田间耗水量及耗水结构的影响

2.2.1 覆盖作物对马铃薯全生育期田间棵间蒸发、作物蒸腾和田间耗水量的影响 与单作马铃薯相比,覆盖处理均显著降低了马铃薯全生育期的棵间蒸发量,且各处理花后降幅高于花前(图 5A);PM1 处理全生育期棵间蒸发量较 P 处理显著降低

29.64%。在马铃薯花前和花后,各覆盖处理棵间蒸发量均显著低于P处理,降幅分别为12.91%~21.62%和27.64%~36.45%,其中PM1处理最低;提前播种条件下,PM1处理花前和花后棵间蒸发量分别较PV1处理显著降低10.00%和12.19%,覆盖作物与马铃薯同期播种的PV2和PM2处理间则无显著差异。相同覆盖作物条件下,PV2较PV1处理花后棵间蒸发量显著降低7.66%,PM1较PM2处理显著降低9.21%。

与P处理相比,PV2处理显著提升了作物全生育期蒸腾量,其余覆盖处理对作物全生育期蒸腾量无显著影响(图5B)。马铃薯花前基本为覆盖作物生长期,PV1处理蒸腾量与P处理无显著差异,PV2、PM1和PM2处理蒸腾量均显著高于P处理,增幅为9.67%~15.65%,三个处理之间无显著差异。花后覆盖作物均已刈割覆盖,与P处理相比,PV1、PV2和PM1处理蒸腾量无显著变化,仅PM2处理显著降低12.41%。

覆盖处理显著降低了马铃薯全生育期耗水量,各覆盖处理间无显著差异(图5C)。马铃薯花前,PV2和PM2处理耗水量较P处理分别显著提高4.93%和8.32%,PV1和PM1处理耗水量与P处理无显著差异。马铃薯花后,各覆盖处理耗水量均显著低于P处理,降幅为5.85%~16.64%;相同覆盖作物条件下,PV1和PV2处理间、PM1和PM2处理间的耗水量均无显著差异,其中PM1处理与各覆盖处理无显著差异。

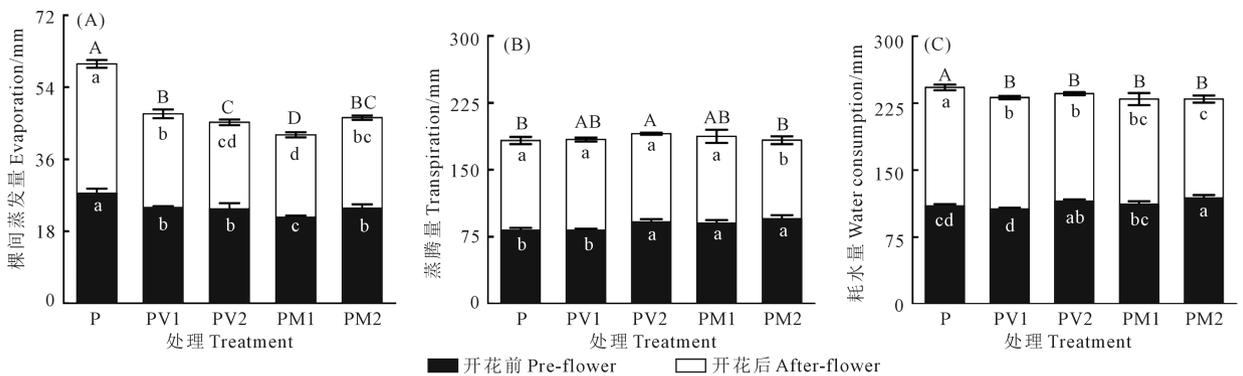
综上所述,与单作马铃薯相比,覆盖处理能不同程度降低马铃薯全生育期棵间蒸发量和田间耗水量,提前两周播种毛叶苕子覆盖处理降低棵间蒸发效果最佳。马铃薯花前,仅提前两周播种毛叶苕

子覆盖处理的蒸腾量显著高于单作马铃薯且耗水量与单作马铃薯无显著差异。

2.2.2 覆盖作物对马铃薯田间蒸发与蒸散比的影响 覆盖处理显著降低了马铃薯全生育期的田间蒸发与蒸散比(E/ET),且花后降幅高于花前(图6)。马铃薯花前和花后,覆盖处理 E/ET 值均显著低于P处理,降幅分别为10.06%~23.03%和15.03%~28.16%,以PM1的 E/ET 值最低。提前播种条件下,PM1与PV1处理间花后 E/ET 值无显著差异;相同覆盖作物条件下,PV1和PV2处理间无显著差异,PM1较PM2处理显著降低14.55%。与P处理相比,PV1、PV2、PM1和PM2处理马铃薯田间全生育期 E/ET 值分别显著降低16.98%、22.17%、25.66%和18.08%。综上可知,提前两周播种毛叶苕子覆盖处理对马铃薯全生育期田间蒸发与蒸散比降低效果最佳。

2.3 覆盖作物对马铃薯产量和水分利用效率的影响及覆盖作物生物量

由表2可知,各覆盖处理均能不同程度提高马铃薯的块茎产量和水分利用效率,且总体表现为毛叶苕子覆盖处理高于箭筈豌豆。各覆盖处理块茎产量较P处理提高3.55%~35.95%,其中PM1处理块茎产量最高,较其余各处理显著提高8.89%~35.95%,PV2和PM2处理间块茎产量无显著差异,但均显著高于PV1处理。PM1处理商品薯率显著高于其余处理,增幅为17.10%~49.98%;与P处理相比,PV1和PM2处理的商品薯率无显著变化,PV2处理商品薯率则显著降低。各覆盖处理水分利用效率较P处理显著提高8.71%~43.75%,其中PM1处理水分利用效率最高,较其余各处理显著提高8.87%~43.75%;PM1和PM2处理水分利用效率



注:不同大写字母代表全生育期各处理间差异显著($P<0.05$);不同小写字母代表相同生育阶段下各处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different capital letters represent significant differences between treatments throughout the whole growth period ($P<0.05$). Different lowercase letters represent significant differences between treatments in the same growth stage ($P<0.05$).

图5 不同处理下马铃薯全生育期棵间蒸发量、作物蒸腾量和田间耗水量

Fig.5 Soil evaporation, crop transpiration and field water consumption during the whole growth period of potato under different treatments

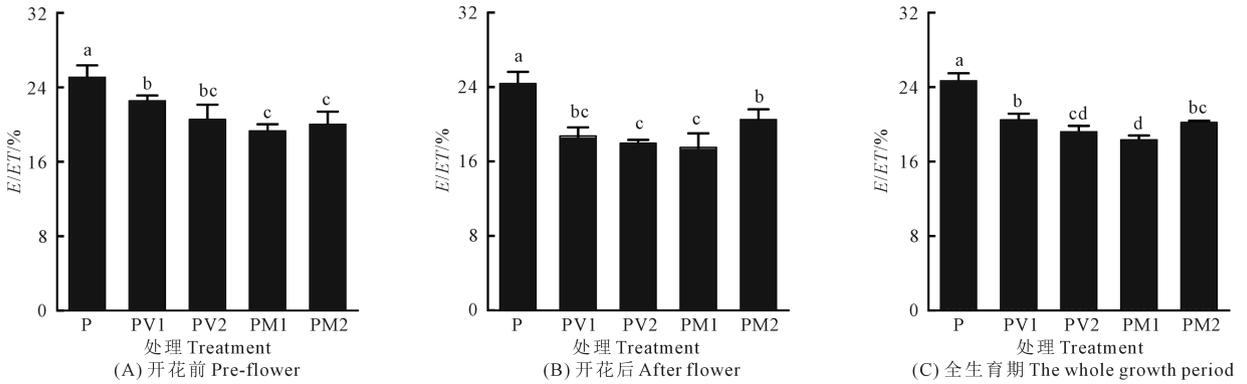


图 6 不同处理下马铃薯全生育期田间蒸发与蒸散之比

Fig.6 E/ET of potato fields during the whole growth period of potato under different treatments

表 2 不同处理下马铃薯块茎产量和水分利用效率

Table 2 Potato tuber yield and water use efficiency under different treatments

处理 Treatment	块茎产量 Tuber yield /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	商品薯率 Commercial potato rate/%	耗水量 Water consumption /mm	水分利用效率 Water use efficiency /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)	覆盖作物生物量 Biomass of cover crop /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
P	11120±806c	39.37±1.79b	242.58±4.61a	45.81±2.57e	
PV1	11515±364c	39.44±4.23b	231.21±3.20b	49.80±0.93d	1479.29±53.16ab
PV2	13091±577b	31.51±2.76c	235.60±1.80b	55.56±2.24c	1494.88±35.56a
PM1	15118±357a	47.26±5.30a	229.55±3.98b	65.85±0.70a	1450.68±42.80ab
PM2	13884±181b	40.36±3.87b	229.52±1.54b	60.49±0.87b	1398.93±55.24b

注:同列不同小写字母表示具处理间有显著差异($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters within a column indicate significantly differences between treatments ($P<0.05$).

显著高于 PV2 和 PV1 处理。同种覆盖作物处理间覆盖作物生物量无显著差异,相同播期不同覆盖条件下, PV1 处理覆盖作物生物量高于 PM1,但两处理间无显著性差异, PV2 处理覆盖作物生物量较 PM2 处理显著提高 6.86%。综上可知,提前两周播种毛叶苕子覆盖处理对马铃薯块茎产量和水分利用效率提升效果均最佳,箭筈豌豆刈割期生物量整体上高于毛叶苕子。

3 讨论

3.1 覆盖作物对马铃薯产量和水分利用效率的影响

研究表明,合理种植覆盖作物能够提高主栽作物产量和水分利用效率^[9,20]。Meyer 等^[21]用十字花科和豆科混合做覆盖作物的研究表明,刈割期的选择对主栽作物产量有重要影响,过迟刈割会因覆盖作物对土壤水分的过度消耗而降低主栽作物产量。本研究中,不同覆盖作物和不同刈割期覆盖处理马铃薯块茎产量均较对照有所提高,增幅为 3.55%~35.95%,水分利用效率亦显著提高 8.71%~43.75%。可能是因为本研究所选覆盖作物均为豆科作物,具有低耗水特性^[22],而十字花科覆盖作物具有主根和生物量较大的特性^[23],因而生长耗水更多,与主栽作物水分竞争更强烈。Wang 等^[24]来自世界各地

117 项研究数据为例,通过 Meta 分析评价覆盖作物对主栽作物产量和水分利用效率的影响发现,与单作相比,半干旱、半湿润和湿润区种植覆盖作物均能提升主栽作物的水分利用效率;半干旱区若覆盖作物刈割过迟可能会导致主栽作物产量下降,半湿润和湿润区种植覆盖作物能够提升主栽作物产量。这与本研究结果相似。因此,在陇中旱农区,马铃薯播前两周到播种期,在垄沟种植覆盖作物箭筈豌豆或毛叶苕子,能够提高该区马铃薯产量和水分利用效率,保障该区马铃薯稳产高产。

3.2 覆盖作物提高马铃薯水分利用效率的机制

覆盖措施和降水在生育时期分布均会影响土壤水分和作物耗水^[25]。本研究中,马铃薯花前基本为覆盖作物生长期,毛叶苕子覆盖处理 0~110 cm 土层平均土壤含水量整体上高于箭筈豌豆,箭筈豌豆刈割期生物量整体上高于毛叶苕子,这说明毛叶苕子相比箭筈豌豆具有更低的耗水特性。前人研究表明,马铃薯花后主要进行地下部生长^[26],此时较高的耗水量有利于块茎产量形成^[27]。本研究中,与对照相比,覆盖处理能不同程度提高马铃薯花后田间 0~110 cm 土层平均土壤含水量和块茎膨大期土壤贮水量,以提前播种毛叶苕子覆盖处理提升效果最佳。这可能与覆盖作物能促进降水入渗和降

低土壤无效蒸发有关^[23]。此外本研究通过调整覆盖作物播期,使其在马铃薯花期之前均已刈割覆盖,从而降低其与马铃薯花后对土壤水分的竞争。花后土壤水分的增加能为马铃薯块茎膨大期提供充足的水分保障;且覆盖作物秸秆能降低土壤温度^[28],花后较低的土壤温度也有利于马铃薯生长和块茎产量增加^[29]。

田间耗水包括土壤棵间蒸发和作物蒸腾,减少棵间蒸发这部分无效损耗有利于提高作物水分利用效率^[30-31]。本研究中,覆盖处理能不同程度降低马铃薯全生育期的棵间蒸发量,以提前播种毛叶苕子处理降低效果最好。这可能与覆盖作物的茎形态有关,毛叶苕子茎为蔓生偏匍匐态,而箭筈豌豆茎为斜升偏直立态^[32],前者更有利于蓄水保墒。此外,与同期播种覆盖作物相比,马铃薯播前两周播种覆盖作物可保证其与马铃薯有更短的共生期和更长的覆盖期。本研究发现,马铃薯花前(即覆盖作物生长期),提前播种毛叶苕子覆盖处理蒸腾量显著高于对照,但两者耗水量差异不大;说明毛叶苕子覆盖种植期间减少的棵间蒸发量能够弥补其生长期增加的蒸腾耗水。而提前播种毛叶苕子覆盖处理的花后和全生育期耗水量显著低于对照,但蒸腾量与对照无显著差异,且显著降低了马铃薯全生育期田间蒸发与蒸散比;说明其能够降低田间土壤水分蒸发的无效损耗,优化作物耗水结构。综上所述可知,陇中旱农区马铃薯播前两周垄沟播种毛叶苕子,毛叶苕子生长期减少的棵间蒸发量能够弥补其生长增加的蒸腾耗水,刈割后覆盖在垄沟能够增加马铃薯花后土壤水分,为块茎膨大期提供水分保障,并通过降低马铃薯全生育期田间无效蒸发来优化农田耗水结构,从而提高水分利用效率。这与前人研究结论相似^[33]。

4 结 论

与传统单作马铃薯相比,马铃薯播前两周垄沟播种毛叶苕子能够显著提升马铃薯块茎产量和商品薯率,增幅分别为35.95%和20.04%;且毛叶苕子生长期减少的棵间蒸发量能够弥补其生长增加的蒸腾耗水,使马铃薯花后土壤含水量增加16.63%,块茎膨大期土壤贮水量提高7.78%,同时马铃薯全生育期田间无效蒸发降低29.64%,蒸发与蒸散比降低25.66%,使总耗水减少5.37%,从而使马铃薯水分利用效率提高43.75%。可见,马铃薯播前两周垄沟播种毛叶苕子可作为陇中旱农区推荐的马铃薯生产模式。

参 考 文 献:

- [1] MAAS A, FULLER K B, HATZENBUEHLER P, et al. An exploration of preferences for soil health practices in potato production [J]. *Farming System*, 2023, 1(3): 100054.
- [2] 齐月, 赵鸿, 雷俊, 等. 黄土高原半干旱区马铃薯产量对气候变化的响应[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(1): 193-200, 220. QI Y, ZHAO H, LEI J, et al. Response of potato yield to climate change in semi-arid region of the Loess Plateau [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(1): 193-200, 220.
- [3] 罗其友, 刘洋, 高明杰, 等. 中国马铃薯产业现状与前景[J]. *农业展望*, 2015, 11(3): 35-40. LUO Q Y, LIU Y, GAO M J, et al. Status quo and prospect of China's potato industry [J]. *Agricultural Outlook*, 2015, 11(3): 35-40.
- [4] 黄高宝, 郭清毅, 张仁陟, 等. 保护性耕作条件下旱地农田麦-豆双序列轮作体系的水分动态及产量效应[J]. *生态学报*, 2006, 26(4): 1176-1185. HUANG G B, GUO Q Y, ZHANG R Z, et al. Effects of conservation tillage on soil moisture and crop yield in a phased rotation system with spring wheat and field pea in dry land [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1176-1185.
- [5] DU T S, KANG S Z, ZHANG J H, et al. Deficit irrigation and sustainable water-resource strategies in agriculture for China's food security [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(8): 2253-2269.
- [6] 段雅欣, 禄兴丽, 刘继虎, 等. 间作豆科作物对马铃薯产量及土壤性状影响的研究进展[J]. *东北农业科学*, 2023, 48(3): 96-101, 133. DUAN Y X, LU X L, LIU J H, et al. Research progress on the effect of intercropping legumes on potato yield and soil properties [J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2023, 48(3): 96-101, 133.
- [7] 张海燕, 汪宝卿, 冯向阳, 等. 不同时期干旱胁迫对甘薯生长和渗透调节能力的影响[J]. *作物学报*, 2020, 46(11): 1760-1770. ZHANG H Y, WANG B Q, FENG X Y, et al. Effects of drought treatments at different growth stages on growth and the activity of osmotic adjustment in sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(11): 1760-1770.
- [8] 高华援, 梁桓赫, 王凤, 等. 中国马铃薯栽培技术研究进展[J]. *吉林农业科学*, 2007, 32(5): 17-19, 27. GAO H Y, LIANG H H, WANG F, et al. Advance in studies of potato cultural techniques in China [J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2007, 32(5): 17-19, 27.
- [9] 张建恒, 张益兴, 侯赛赛, 等. 覆盖作物的效益及其合理选择的研究进展[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(14): 23-34. ZHANG J H, ZHANG Y X, HOU S S, et al. Research progress on benefits and rational selection of cover crops [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(14): 23-34.
- [10] 刘燕青, 王计磊, 李子忠. 秸秆覆盖对土壤水分和侵蚀的影响研究进展[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(6): 429-436. LIU Y Q, WANG J L, LI Z Z. Research process on the effects of straw mulch on soil moisture and soil erosion [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(6): 429-436.
- [11] 孙万仓, 裴新梧, 马骊, 等. 我国北方冬季覆盖作物研究进展及发展前景[J]. *中国农业科技导报*, 2022, 24(1): 128-136. SUN W C, PEI X W, MA L, et al. Advances and outlook of winter cover crop development research in northern China [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(1): 128-136.
- [12] MARCILLO G S, MIGUEZ F E. Corn yield response to winter cover

- crops: an updated meta-analysis[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 72(3): 226-239.
- [13] 张绪成, 于显枫, 马一凡, 等. 半干旱区箭舌豌豆播期对间作马铃薯生物量 and 水分利用效率的影响[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(6): 1618-1626.
- ZHANG X C, YU X F, MA Y F, et al. Effects of the sowing date on aboveground biomass and water utilization of potato and spring vetch intercropping systems with vertical rotary sub-soiling tillage on a semi-arid area[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(6): 1618-1626.
- [14] GITARI H I, GACHENE C, KARANJA N, et al. Water use efficiency and yield of potato in potato-legume based intercropping systems in a semi-humid region, Kenya [C]// Twentieth European Association for Potato Research (EAPR), Versailles, France, 2017.
- [15] 李含婷, 柴强, 王琦明, 等. 绿洲灌区不同施氮水平下玉米绿肥间作模式的水分利用特征[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(12): 2608-2618.
- LI H T, CHAI Q, WANG Q M, et al. Water use characteristics of maize-green manure intercropping under different nitrogen application levels in the oasis irrigation area [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(12): 2608-2618.
- [16] REN J H, ZHANG L Z, DUAN Y, et al. Intercropping potato (*Solanum tuberosum* L.) with hairy vetch (*Vicia villosa*) increases water use efficiency in dry conditions [J]. *Field Crops Research*, 2019, 240: 168-176.
- [17] 胡发龙, 柴强, 甘延太, 等. 少免耕及秸秆还田小麦间作玉米的碳排放与水分利用特征[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(1): 120-131.
- HU F L, CHAI Q, GAN Y T, et al. Characteristics of soil carbon emission and water utilization in wheat/maize intercropping with minimal/zero tillage and straw retention[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(1): 120-131.
- [18] 关婷, 樊明寿, 贾立国. 基于微型蒸发器估算不同作物棵间蒸发的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(2): 63-67.
- GUAN T, FAN M S, JIA L G. Estimation of evaporation between plants based on micro-evaporators: research progress [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(2): 63-67.
- [19] 彭正凯, 李玲玲, 谢军红, 等. 不同耕作措施对旱地作物生育时期农田耗水结构和水分利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 214-221.
- PENG Z K, LI L L, XIE J H, et al. Effects of different tillage practices on water consumption structure and water use efficiency during crop growth period in arid farmland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 214-221.
- [20] 魏静, 郭树芳, 翟丽梅, 等. 覆盖作物翻压对华北平原春玉米产量和土壤养分的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020, (1): 172-178.
- WEI J, GUO S F, ZHAI L M, et al. Effects of the incorporation of winter cover crop on succeeding spring maize yield and soil nutrient in the North China plain [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2020, (1): 172-178.
- [21] MEYER N, BERGEZ J E, CONSTANTIN J, et al. Cover crops reduce drainage but not always soil water content due to interactions between rainfall distribution and management [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 231: 105998.
- [22] 马佳玉, 王涛, 刘小利, 等. 覆盖作物对我国粮食作物的产量效应及影响因素的 Meta 分析[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(10): 1871-1880.
- MA J Y, WANG T, LIU X L, et al. Meta-analysis of yield effects and influencing factors of cover crops on main grain crops in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(10): 1871-1880.
- [23] 蹇述莲, 李书鑫, 刘胜群, 等. 覆盖作物及其作用的研究进展[J]. *作物学报*, 2022, 48(1): 1-14.
- JIAN S L, LI S X, LIU S Q, et al. Research advances of cover crops and their important roles [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(1): 1-14.
- [24] WANG J, ZHANG S H, SAINJU U M, et al. A meta-analysis on cover crop impact on soil water storage, succeeding crop yield, and water-use efficiency [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256: 107085.
- [25] 韩国, 苗芳芳, 王楠, 等. 深松覆盖模式对宁南地区雨养马铃薯水分利用效率的影响[J]. *中国农业气象*, 2021, 42(11): 905-917.
- HAN G, MIAO F F, WANG N, et al. Effects of subsoiling with mulching pattern on water use efficiency of potato in rainfed region of Southern Ningxia [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2021, 42(11): 905-917.
- [26] 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.
- [27] 肖厚军, 孙锐锋, 何佳芳, 等. 不同水分条件对马铃薯耗水特性及产量的影响[J]. *贵州农业科学*, 2011, 39(1): 73-75.
- XIAO H J, SUN R F, HE J F, et al. Effects of different water-supply on yield and water consumption characteristics of potato [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2011, 39(1): 73-75.
- [28] 吴春花, 普雪可, 周永瑾, 等. 宁南旱区沟垄集雨结合覆盖对土壤水热肥与马铃薯产量的影响[J]. *作物学报*, 2021, 47(11): 2208-2219.
- WU C H, PU X K, ZHOU Y J, et al. Effects of ridge-and-furrow rainwater harvesting with mulching on soil water-heat-fertility and potato yield in arid areas of Southern Ningxia [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(11): 2208-2219.
- [29] 张淑敏, 宁堂原, 刘振, 等. 不同类型地膜覆盖的抑草与水热效应及其对马铃薯产量和品质的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(4): 571-580.
- ZHANG S M, NING T Y, LIU Z, et al. Weed infestation, soil moisture, and temperature under mulching cultivation with different films and the effects on yield and quality of potato [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(4): 571-580.
- [30] 王晓娟, 黄高宝, 李卿沛, 等. 不同耕作措施下旱地春小麦田和豌豆田的蒸发蒸腾特性及产量效应[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(5): 172-177.
- WANG X J, HUANG G B, LI Q P, et al. Characteristics of the evapotranspiration and its yield performance of rainfed spring wheat and peas fields [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(5): 172-177.
- [31] 胡发龙, 柴强, 殷文. 少耕秸秆覆盖对小麦间作玉米棵间蒸发的影响研究[J]. *农业现代化研究*, 2013, (6): 754-757.
- HU F L, CHAI Q, YIN W. Effect of stubble mulching and reduced tillage on soil evaporation in wheat-maize intercropping [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2013, (6): 754-757.
- [32] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志(第 42 卷) [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 241-268.
- Editorial Committee of Flora of China. *Chinese Academy of Sciences Flora of China (Volume 42)* [M]. Beijing: Science Press, 1998: 241-268.
- [33] DABNEY S M. Cover crop impacts on watershed hydrology [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1998, 53(3): 207-213.