

粉垄与覆膜对宁南旱区土壤物理性状及马铃薯产量的影响

张邦彦¹,何文寿¹,李惠霞¹,陈彦云³,何进宇²

(1.宁夏大学农学院,宁夏 银川 750021;2.宁夏大学土木与水利工程学院,宁夏 银川 750021;
3.宁夏大学生命科学学院,宁夏 银川 750021)

摘 要:于 2018—2019 年在西吉县新营乡白城村进行了田间试验,设置耕作与覆膜二因素裂区试验,主区为耕作方式,设置传统旋耕 20 cm(CT)和粉垄耕作 30 cm(FL30)、45 cm(FL45)、60 cm(FL60)等 4 个耕作处理;副区为地膜覆盖,设置不覆膜(NM)和覆黑膜(BM)。测试了土壤的物理性状与马铃薯产量,研究了粉垄与覆膜对土壤物理性状及马铃薯产量的影响。结果表明:与传统耕作相比,粉垄可有效降低耕层土壤容重,改善土壤孔隙状况,其中以粉垄 45 cm 处理效果较优,粉垄 45 cm 处理 0~60 cm 平均土壤容重和孔隙度分别较传统耕作显著降低和提高了 5.70%、5.28%。与传统耕作相比,粉垄可使 0~60 cm 土层>0.25 mm 机械稳定性团聚体数量显著增加 4.95%。粉垄、覆膜及二者交互作用对马铃薯关键生育期土壤贮水量影响显著,其中粉垄 60 cm 覆膜处理较传统耕作不覆膜处理显著提高 22.26%。在所有处理组合中,粉垄 45 cm 覆膜处理的马铃薯总产量、商品薯率最高,分别较传统耕作不覆膜处理提高 69.69%和 15.15%。因此,粉垄覆膜方式显著改善了旱地土壤物理性质,有利于蓄水保墒,对马铃薯生长有利,以粉垄 45 cm 覆膜处理的增产和提高水分效果最佳。

关键词:马铃薯;粉垄;覆膜;土壤物理性状;产量;宁南旱区

中图分类号:S532;S34 **文献标志码:**A

Effects of deep vertically rotary tillage and film mulching on soil physical properties and potato yield in the arid area of Southern Ningxia

ZHANG Bangyan¹, HE Wenshou¹, LI Huixia¹, Chen Yanyun³, HE jinyu²

(1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;
2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;
3. School of Life Sciences, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Field trials were carried out in Baicheng Village, Xinying Township, Xiji County in 2018 and 2019 with two-factor split zone design experiment of film mulching. The main area had four tillage treatments of conventional rotary tillage to 20 cm depth (CT) as a control, deep vertically rotary tillage to 30 cm (FL30), 45 cm (FL45), and 60 cm (FL60) depths, and the secondary area was set for two treatments of black film (BM) and without film (NM).The soil physical properties and potato yield were measured, and the influence of deep vertically rotary tillage and film mulching on soil physical properties and potato yield was studied. The results showed that, compared with traditional tillage, deep vertically rotary tillage effectively reduced the soil bulk density of the plough layer and improved the soil porosity. Among them, the effect of deep vertically rotary tillage to 45 cm treatment was better, and the average soil bulk density and porosity of 0~60 cm in the deep vertically rotary tillage to 45 cm treatment were significantly reduced the soil bulk density by 5.70% and increased the soil porosity by 5.28%, respectively, compared with traditional farming. Compared with traditional farming, deep vertically rotary tillage significantly increased the

收稿日期:2021-05-02 修回日期:2021-12-14

基金项目:宁夏回族自治区青年科技人才托举工程项目(TJGC2018058);宁夏回族自治区重点研发计划项目(2018BFF02002);宁夏回族自治区自然科学基金(2021AAC03112);宁夏大学大学生创新创业训练计划项目(2021107490455)

作者简介:张邦彦(1996-),男,甘肃白银人,硕士研究生,研究方向为植物营养与土壤环境。E-mail:2420030658@qq.com

通信作者:何进宇(1986-),男,宁夏银川人,副教授,博士,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail:hejinyu2017@163.com

number of aggregates with mechanical stability of 0~60 cm soil layer >0.25 mm by 4.95%. The deep vertically rotary tillage, film mulching and the interaction of the two had significant effects on soil water storage during the key growth period of potato. The deep vertically rotary tillage to 60 cm mulching treatment significantly increased by 22.26% compared with the traditional farming without film mulching treatment. Among all treatment combinations, the total potato yield and the rate of commercial potatoes were the highest in deep vertically rotary tillage to 45 cm mulching treatment, which was 69.69% and 15.15% higher than that of the traditional farming without mulching. Improving the physical properties of dry land soil with the deep vertically rotary tillage and film mulching treatment was beneficial to water storage and moisture retention, and thus potato growth. The effect of increasing production and water content in the deep vertically rotary tillage to 45 cm with film mulching was the most significant.

Keywords: potato; deep vertically rotary tillage; film mulching; soil physical properties; yield; arid area of Southern Ningxia

宁夏南部山区(简称“宁南山区”)是我国北方主要马铃薯产区之一^[1]。马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是目前仅次于水稻、小麦和玉米的世界第四大粮食作物^[2],它以抗旱、高产、高效的特色优势成为宁南山区农民增收和发展农村经济的特色支柱产业。全区马铃薯种植面积已经接近 21 万 hm^2 ^[2-3]。宁南山区降水稀少、气候干燥、蒸发强烈,且降水时空分布不均,农业灌溉严重依赖自然降雨,属于典型干旱半干旱雨养农业区,因此有效降水的高效利用是宁夏旱作区农业生产面临的主要问题^[4]。而合理的耕作措施可改良土壤结构,提高土壤蓄水保墒能力,从而达到充分利用自然降雨的目的。

耕作措施可以影响土壤结构,进而影响土壤物理性质。合理的耕作措施能有效改善土壤的水、肥、气、热条件,以物理方式提升土壤肥力,从而达到作物增产提质的效果^[5]。传统耕作方式以铧犁式翻耕为主,长期连年翻耕会使土壤耕层变浅、结构紧实、物理性状恶化,导致根系难以下扎,出现作物可利用的水分减少、耕地质量和土壤蓄水保肥能力严重下降等问题^[6-7]。近年来广西农业科学院韦本辉研究员^[8]研究提出一种新的农耕方法——粉垄耕作技术,它是按照不同作物种植对耕层松土深浅程度需求不同,利用粉垄机械上并列的多个螺旋形钻头(替代传统耕作犁等),一次性将土壤垂直旋磨粉碎并自然悬浮成垄的方法。可通过控制钻头的入土深度,完成不同的作业深度,目前最深可至 100 cm。该方法具有深耕深松不乱土层,打破犁底层,激活土壤速效养分,作物种植带下呈现“U”型松土槽可积聚雨水等优点^[8-10]。地膜覆盖具有增温、保墒、抑制杂草、将积蓄降水无效变为有效等优点,在发展旱作农业方面具有巨大潜力^[11-12]。近年来,黑色地膜覆盖成为干旱半干旱地区马铃薯增产的主要技术手段,黑膜透光率低、辐射热透过小,控温

和降温效果较好。能够抑制杂草,防止马铃薯变绿,改善农作物生长环境,提高水分利用率,进一步增加马铃薯产量^[12-14]。

前人研究表明,耕作结合覆膜的种植方式保水保温效果明显,可促进作物干物质的积累,有利于玉米、马铃薯产量及水分利用效率的提高^[5,15]。然而,目前尚缺乏旱作雨养农业区耕作与覆膜措施交互在马铃薯方面的研究,特别是粉垄耕作结合覆膜的研究鲜见报道。本研究以‘青薯 9 号’为研究对象,采用土壤耕作处理(传统耕作与粉垄)与黑色地膜覆盖相结合的种植模式,针对宁南山区春季干旱少雨、严重制约马铃薯生产的特征,研究粉垄耕作、黑膜覆盖及二者交互对土壤物理性质及马铃薯产量的影响,从而筛选出适合宁南山区马铃薯生产的最佳粉垄覆膜模式,以期为马铃薯高产高效栽培提供实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2019—2020 年在宁夏固原市西吉县白城村马铃薯科研试验基地(105°31'E, 36°6'N)进行。试验区域属于干旱半干旱带,且降水量较少,年均降水量在 437.9 mm(2020 年均降水量为 444.5 mm),平均海拔 2 026.4 m、无霜期 146 d 左右、年均气温 6.8℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温 2 000℃~2 300℃,光照资源充足,无灌溉条件,属于典型雨养农业区。试验期内降雨量、气温如图 1 所示。土壤类型为侵蚀黑垆土,耕层平均土壤有机质含量为 12.6 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 0.73 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 0.45 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮、速效磷、速效钾分别为 26.4、22.2、103.7 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,属低等肥力水平。

1.2 供试材料

试验用种为青薯 9 号原种。供试肥料为尿素

(含 N $\geq$ 46%,宁夏和宁化学有限公司),磷酸二铵(含 N $\geq$ 18%,P₂O₅ $\geq$ 46%,白银九星农化科技有限公司),硫酸钾(含 K₂O $\geq$ 50%,国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司)。地膜采用黑色地膜(宽度 1 200 mm,厚度 0.008 mm 的聚乙烯微膜,灵武市塑料制品有限公司),供试机械为五丰机械研制的第四代粉垄机(型号 YC6MK400-T301)。

1.3 试验设计与田间管理

田间试验采用双因素裂区设计,设耕作方式和覆膜 2 个因子,主处理为耕作方式,分别为传统耕作 20 cm (CT)、粉垄 30 cm (FL30)、粉垄 45 cm (FL45)、粉垄 60 cm (FL60) 4 种耕作方式;副处理为覆膜,分别为不覆膜(NM)、覆黑膜(BM) 2 种覆膜措施,试验共设 8 个处理,3 次重复,共 24 个小区,小区面积 80 m²(8 m $\times$ 10 m),随机区组排列。为了便于实施耕作,主处理采用大区,每个处理面积为 480 cm²(60 m $\times$ 80 m)。耕作处理如下:(1)粉垄处理:

2019 年 10 月初秋作物收获后,采用粉垄机进行作业,耕作深度 30~60 cm,次年 4 月下旬穴播马铃薯。(2)传统耕作处理:2019 年 10 月初秋作物收获后采用传统的铧式犁拖拉机耕翻土壤,耕作深度 20~25 cm,次年 4 月中旬再次耕翻土壤,耕后耙耱各 1 次,4 月下旬穴播马铃薯。耕作前一次性表施化学肥料尿素 375 kg $\cdot$ hm⁻²,磷酸二铵 255 kg $\cdot$ hm⁻²,硫酸钾 180 kg $\cdot$ hm⁻²,现蕾期追肥尿素 75 kg $\cdot$ hm⁻²。折合纯氮磷钾养分比为 17:8:6。

试验地前茬作物为马铃薯,一直采用传统翻耕。试验期间无灌溉,采用起垄覆膜双行种植,人工点播,膜宽 1.2 m,株距 40 cm,行距 50 cm,种植深度 15~20 cm,密度 50 000 株 $\cdot$ hm²,穴播后盖土 5 cm,小区间打埂(高 20 cm,底宽 30 cm),苗期、现蕾期中耕培土 2 次。试验于 2020 年 4 月 26 日覆膜、播种。播种后出苗前 3~5 叶期用药防止病虫害,试验期间进行人工除草,2020 年 10 月 7 日收获测产。

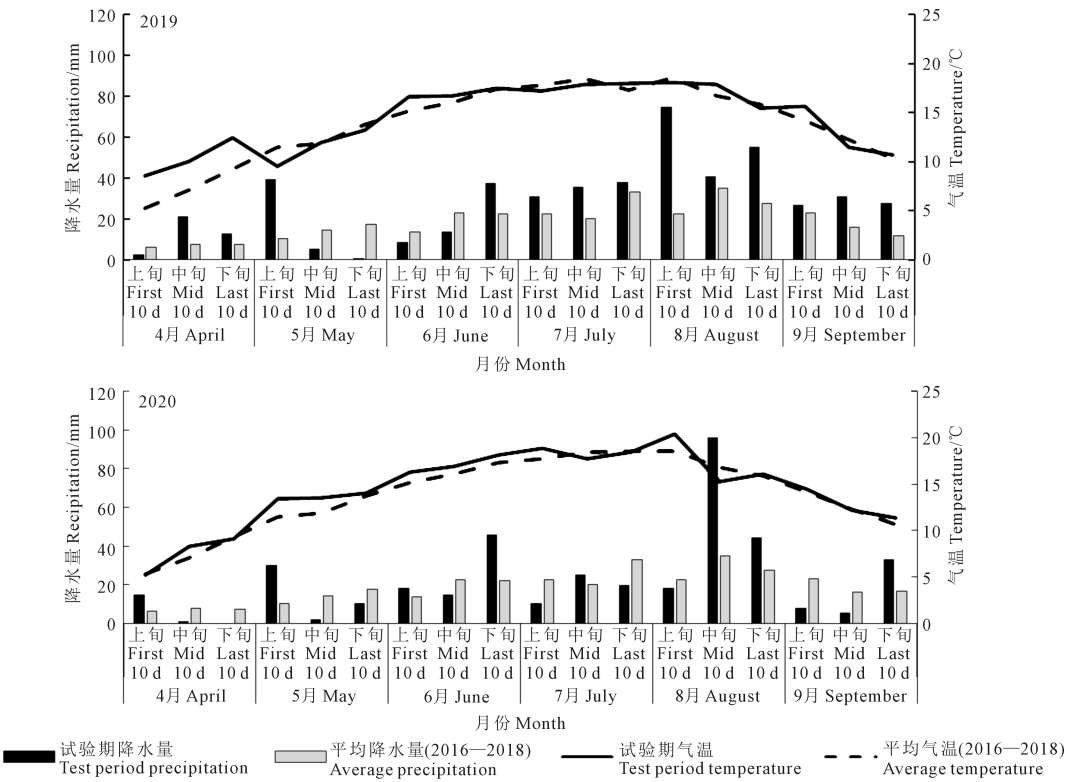


图 1 马铃薯生育期内降雨量、气温特征
Fig.1 Characteristics of precipitation and temperature during potato growing period

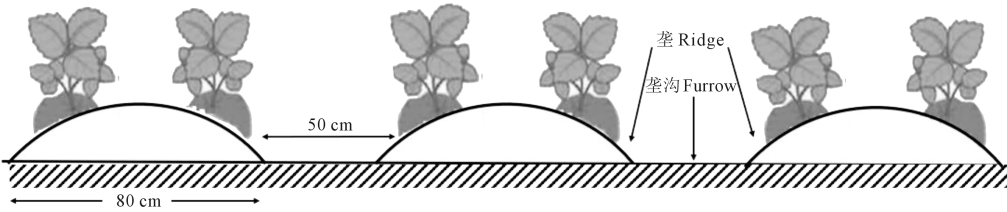


图 2 马铃薯全膜覆盖起垄双行种植模式图
Fig.2 Potato full film mulching ridged double-row planting pattern diagram

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土壤容重 采用环刀法测定 0~80 cm 土层土壤容重。在试验地挖取深度为 100 cm 的土壤剖面,用环刀以 20 cm 为间隔分层取样,测定深度为 80 cm,每层重复 3 次。

1.4.2 土壤总孔隙度^[16] 土壤总孔隙度(%)=(1-土壤体积质量/土壤比重)×100%,土壤比重取近似值,2.65 g·cm⁻³。

1.4.3 土壤团聚体含量 在 2020 年 10 月马铃薯收获后,各小区均按 0~20、20~40、40~60 cm 土层采集原状土样,每小区 3 次重复,带回实验室自然风干,沿土壤结构的自然裂痕剥离成直径约为 1 cm³ 的小团块并剔除有机残体和石块,利用干筛法测定土壤机械稳定性团聚体的粒级分布及稳定性^[17]。>0.25 m(>5、2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5 m)团聚体含量计算公式为:

$$DR_{0.25} = \sum_{i=1}^n (W_i)$$

(1)

式中, $DR_{0.25}$ 为 > 0.25 mm 土壤团聚体含量,%; W_i 为对应粒级团聚体百分含量,%。

1.4.4 土壤水分 马铃薯生育期(播种、苗期、现蕾、块茎形成、块茎膨大和收获)在每个处理马铃薯植株附近 10 cm 区域随机采取 3 个重复,采用土钻

取土,烘干法测定 0~80 cm 土层土壤含水率。

1.4.5 土壤贮水量^[18]

$$W = h \times a \times b \times 10$$

(2)

式中, W 为土壤贮水量,mm; h 为土层深度,cm; a 为土壤容重(干基),g·cm⁻³; b 为土壤质量含水量,%。

1.4.6 气象数据 降雨量和气温等数据来源于试验基地气象生态环境监测仪(TRM-ZS2 型,锦州阳光气象科技有限公司)。

1.4.7 马铃薯产量 在马铃薯收获期,分小区进行测产,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)质量,折算产量,并计算其商品薯率、小薯率。商品薯率为 75 g 以上单薯产量占马铃薯总产量的百分比。

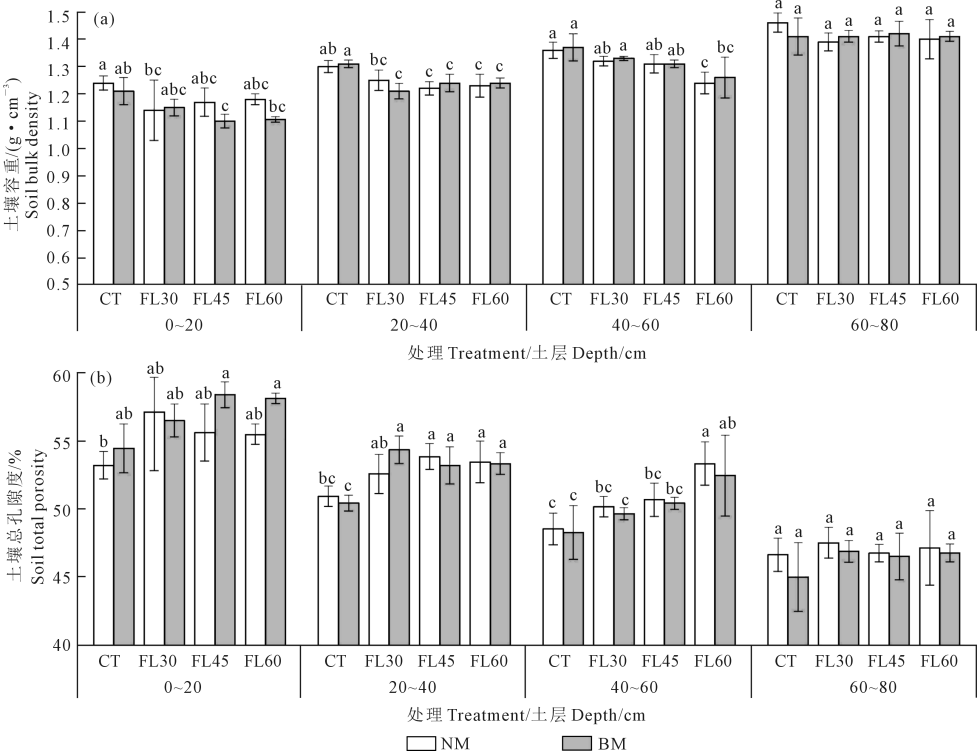
1.5 数据处理与统计分析

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据处理,SPSS 18.0 进行裂区设计方差分析,Duncan 法进行多重比较,并利用 Origin 2019b 进行制图。

2 结果与分析

2.1 粉垄与覆膜对土壤容重及孔隙度的影响

由图 3 可知,耕作方式对于 0~80 cm 土层土壤容重具有显著影响,而覆膜措施对 0~80 cm 土层土



注:不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments (P<0.05).

图 3 各处理 0~80 cm 土壤容重和孔隙度的变化

Fig.3 Changes of soil bulk density and porosity of 0~80 cm in each treatment

壤容重无显著影响。同一覆膜措施下,粉垄耕作较传统耕作 0~80 cm 容重均有不同程度的下降,降幅达 4.8%~11.3%。其中,0~20 cm 土层与 CT 处理相比,FL45 容重下降幅度最显著达 7.3%。在所有处理组合中,FL45×BM 处理降幅最为显著($P<0.05$),达 10.2%。FL60×BM 处理次之,降幅为 9.6%。20~40 cm 土层与 CT 处理相比,FL45 容重下降幅度最显著达 5.7%。在所有处理组合中,FL30×BM 和 FL45×NM 处理土壤容重分别较 CT 处理降低 7.3%和 6.5%。而 40~60 cm 和 60~80 cm 土层各处理间无显著差异。可见,FL45 处理相对于传统耕作方式可有效降低土壤的容重。

粉垄处理下 0~60 cm 土壤孔隙度均比 CT 明显增加,且随土层的加深而减小(图 3b),而 60~80 cm 土层粉垄处理土壤容重和孔隙度变化不显著,可能由于作业深度没达到 60~80 cm,无法疏松土壤。在所有处理组合中,FL45×BM、FL60×BM 处理 0~20 cm 土层土壤孔隙度显著高于 CT×NM 处理 8.5%和 7.9%;20~40 cm 土层提高 4.46%和 4.69%。40~60 cm 土层 FL60×NM 处理较 CT×NM 提高 10.71%;而 60~80 cm 土层各处理间无显著差异。表明 FL45 处理可使耕层土壤孔隙状况得到改善,促进良好土壤结构的形成。

2.2 粉垄与覆膜对马铃薯生育期土壤水分的影响

2.2.1 0~80 cm 土层水分的时间动态变化 如表 1 所示,耕作方式、覆膜措施对马铃薯播种期 0~80 cm 土层土壤贮水量均有极显著影响。在同一覆膜措施下,FL30、FL45 处理土壤贮水量较 CT 处理显著增加 4.0%和 1.2%。而在同一耕作措施下,覆膜均较不覆膜贮水量显著增加,增幅达 1.1%~6.2%。在所有处理组合中,FL30×BM 处理下土壤贮水量最高,FL45×BM 处理次之,分别较 CT×NM 处理显著提高 6.95%和 3.28%。覆膜对马铃薯苗期 0~80 cm 土层贮水量有极显著影响,无论何种耕作方式,BM 处理较 NM 处理平均土壤贮水量显著提高 5.82%。而在同一覆膜措施下,FL45 处理土壤贮水量最高,其次为 FL60、FL30 和 CT 处理,但各耕作处理间差异不显著。

耕作与覆膜措施可显著影响马铃薯关键生育期(开花期、块茎形成期和块茎膨大期)0~80 cm 土层土壤贮水量。耕作方式对开花期、块茎形成期和块茎膨大期土壤贮水量影响极显著,而覆膜措施对全生育期土壤水分影响极显著,耕作与覆膜交互作用对块茎形成期和块茎膨大期土壤贮水量影响极显著(表 1)。马铃薯开花期,4 种耕作方式中 FL30

处理平均土壤贮水量最高,其次为 FL60、FL45 处理,CT 处理最低。在所有处理组合中,FL60×BM 处理下土壤贮水量最高,而 CT×NM 处理最低,较 CT×NM 处理显著提高 24.82%。同一耕作方式下,BM 处理平均土壤贮水量显著高于 NM 处理 8.8%。马铃薯块茎形成期(7 月中旬),作物耗水量增加,各处理下 0~80 cm 土层土壤贮水量下降。同一耕作方式下,BM 处理平均土壤贮水量显著高于 NM 处理 6.38%。而 4 种耕作方式中土壤平均贮水量表现为 FL60>FL30>FL45>CT,并且各处理与 CT 间均差异显著。在所有处理组合中,FL60×BM 处理土壤贮水量最高,而 CT×NM 处理最低,较 CT×NM 显著提高 19.97%。马铃薯进入块茎膨大期(8 月中旬—9 月初),作物耗水大幅度增加,使得 0~80 cm 土层土壤贮水量降至最低,但下降幅度不大,可能因为 8 月中下旬降雨较多(图 1),降水的补充使土壤水分状况得以恢复。同一耕作方式下 BM 处理平均土壤贮水量显著高于 NM 处理 12.02%。而同一覆膜措施下 FL30 处理平均土壤贮水量最高,CT 处理最低,但耕作处理间差异均不显著。在所有处理组合中,FL30×BM 处理土壤贮水量最高,较 CT×NM 处理显著提高 24.50%。

马铃薯成熟期 0~80 cm 土层土壤贮水量受耕作方式、覆膜措施及其交互作用和生育后期降水量的影响较大(表 1)。耕作方式对土壤贮水量的影响显著,而覆膜措施影响极显著。同一覆膜措施下不同耕作方式土壤贮水量表现为 FL60>FL30>FL45>CT,而耕作处理间均无显著差异。在同一耕作方式下不同覆膜措施平均土壤贮水量表现为 BM>NM,与 NM 处理相比,BM 处理显著增加 27.45%。耕作与覆膜交互对成熟期土壤贮水量影响显著,在所有处理组合中,FL60×BM 处理土壤贮水量最高,FL30×BM 处理次之,其土壤贮水量分别较 CT×NM 处理显著提高 27.84%和 17.47%。

2.2.2 0~80 cm 土层水分的垂直变化 对不同生育期而言,土壤水分随着土层深度的变化不同(图 4)。粉垄提高了马铃薯生育期 0~80 cm 土层的土壤含水量。播种期 0~40 cm 土层 PL45、PL60、PL30 处理较 CT 分别显著增加了 18.49%、13.60%和 11.39%。苗期和开花期(图 4b、c),0~80 cm 土层含水量随着土壤深度的增加呈现先增加后减小的趋势。在所有处理组合中,0~40 cm 土层的土壤含水量到 40 cm 时为垂直深度上最高。40~80 cm 土层土壤中,处理 PL60×BM 的土壤含水量最高,苗期和开花期分别为 19.54%和 24.49%。8 月中旬—9 月初,马铃薯进入块茎形成~膨大期,作物耗水量增

加,蒸发强烈,使 0~40 cm 土层土壤水分降至较低。但 40~80 cm 土层含水量波动幅度不大,是由于这个时期降水量多,降水的补充使土壤水分状况得以恢复(图 1,图 4d、e)。成熟期(图 4f)各粉垄处理的

土壤含水量与苗期相比差异性增大,可能是由于地膜老化破损、耕层水分下移导致集水能力急剧下降,也可能与降水量、土壤表层水分蒸发及该时期马铃薯耗水特点有关。

表 1 各处理马铃薯不同生育时期 0~80 cm 土层贮水量/mm

耕作方式 Farming method	覆膜措施 Mulching measure	生育时期 Growth stage					
		播种 Sowing	苗期 Seeding	开花期 Florescence	块茎形成期 Tuber initiation	块茎膨大期 Tuber expansion	成熟期 Maturity
CT	NM	189.06bc	181.09c	187.64d	183.94d	163.34e	195.34cd
	BM	191.19bc	195.16a	221.83bc	185.47d	190.87c	200.20cd
FL30	NM	193.16bc	186.26bc	227.87ab	195.56d	179.94d	183.96d
	BM	202.20a	195.20ab	231.40ab	213.39ab	203.36a	229.47b
FL45	NM	189.65bc	183.50c	198.88d	201.83cd	186.77cd	199.50cd
	BM	195.27ab	196.90a	211.30c	206.48bc	191.53bc	206.89c
FL60	NM	183.02c	189.10abc	211.59c	195.14d	170.60e	197.64cd
	BM	194.40ab	195.82a	234.22a	220.67a	199.12ab	249.73a
F 值	T	10.46 **	0.46	40.86 **	32.66 **	20.28 **	4.87 *
F value	M	5.66 **	30.28 **	19.32 **	45.06 **	142.75 **	32.48 **
	T×M	0.99	1.06	2.41	9.31 **	11.26 **	6.63 *

注:T、M 分别代表耕作方式和覆膜措施,同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。* 和 ** 分别表示 F 值达显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)水平。下同。

Note: T and M represent farming methods and film mulching measures, respectively. The different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). * and ** respectively indicate that the F values have reached significant ($P<0.05$) and extremely significant ($P<0.01$) levels. The same below.

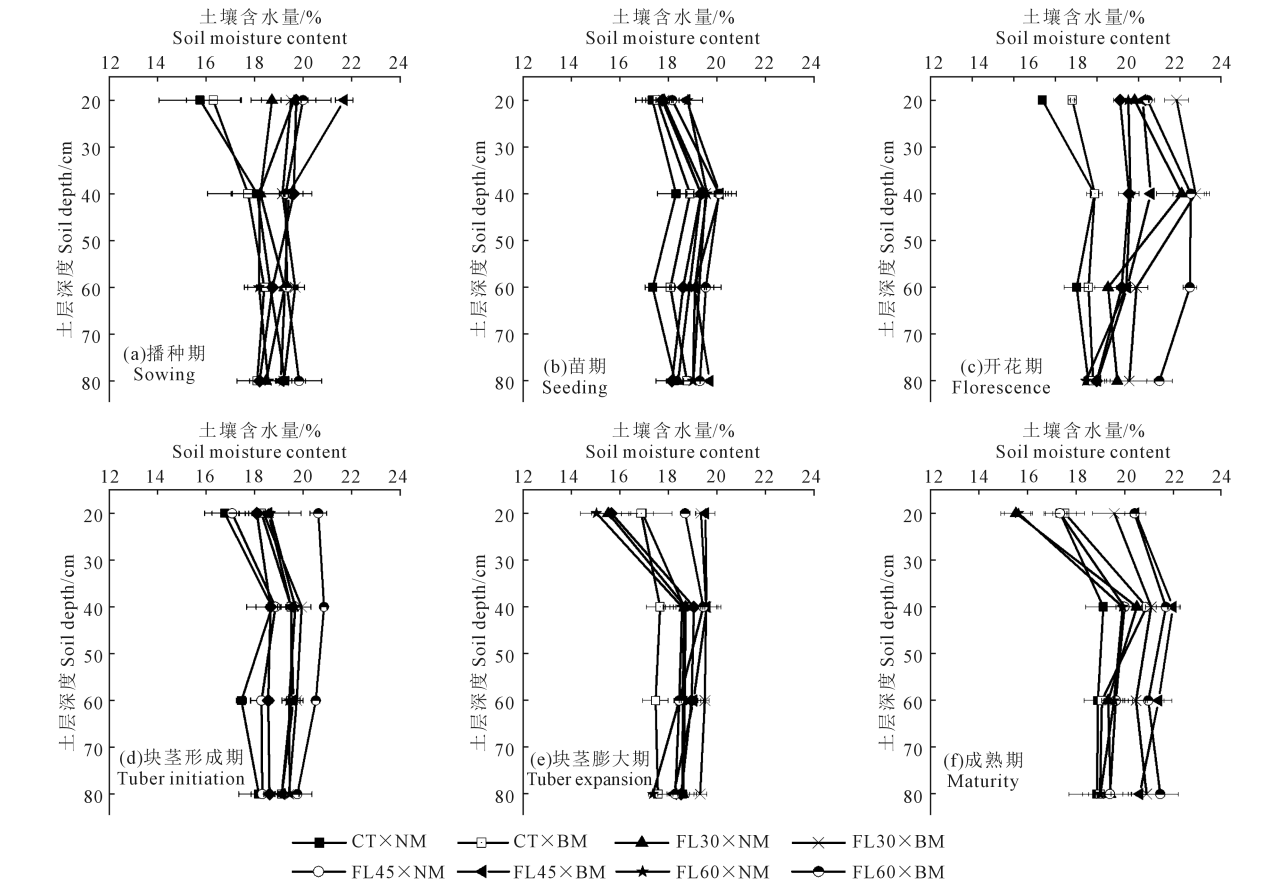


图 4 各处理马铃薯不同生育时期 0~80 cm 土层土壤水分含量变化

Fig.4 Changes of soil water content in 0~80 cm soil layer at different growth periods of potato in each treatment

2.3 粉垄与覆膜对耕层土壤团聚体含量的影响

由表 2 可知,耕作方式对 0~60 cm 土层土壤机械稳定性团聚体均有显著影响。经过粉垄耕作处理后,0~60 cm 土层>0.25 mm 机械稳定性团聚体质量分数($DR_{0.25}$)均较传统耕作显著提高,而<0.25 mm 机械稳定性团聚体质量分数比传统耕作显著降低。0~20 cm 土层,>5 mm、2~5 mm 粒径团聚体质量分数均高于其他粒径,而 1~2 mm 和 0.5~1mm 粒径团聚体质量分数变幅在 6.38%~19.80%之间,<0.25 mm、0.25~0.5 mm 粒径团聚体质量分数稳定在 3.45%~8.65%之间。粉垄各处理 20~40 cm 土层 2~5 mm 粒径团聚体质量分数均高于传统耕作不覆膜,提高幅度达 23.37%~76.26%;0.25~2 mm 粒径团聚体质量分数稳定在 3.68%~18.84%之间。粉垄各处理 2~5 mm、1~2 mm 粒径土壤机械稳定性团聚体含量均随 40~60 cm 土层的加深而增加,0.5~1 mm、

0.25~0.5 mm 粒径团聚体数量相对比较稳定。而粉垄耕作覆黑膜>5 mm 土壤机械稳定性团聚体含量随土层的加深呈减小趋势,均较传统耕作覆黑膜显著提高,增幅为 27.97%~49.89%和 31.11%~95.21%。

同一覆膜措施下,粉垄耕作措施可显著增加 0~60 cm 土层土壤团聚体质量分数。0~60 cm 土层,FL30 处理>0.25 mm 机械稳定性团聚体质量分数($DR_{0.25}$)均为最高。在所有处理组合中,0~60 cm 土层均为 FL30×BM 处理下>0.25 mm 机械稳定性团聚体质量分数($DR_{0.25}$)最高,FL45×NM 处理次之,0~20、20~40、40~60 cm 土层分别较 CT×NM 处理显著提高 5.86%、3.38%、3.33%、3.12%、6.86%、3.98%。4 种耕作方式下,各处理均以大于 0.25 mm 粒径团聚体($DR_{0.25}$)为优势团聚体,并且相对于其他 3 种耕作方式,FL30 处理下团聚体向 $DR_{0.25}$ 粒径的团聚体转化趋势更明显。

表 2 各处理 0~80 cm 土层土壤团聚体粒径分布/%

Table 2 Particle size distribution of soil aggregates in 0~80 cm soil layer in each treatment									
土层 Depth/cm	耕作方式 Farming method	覆膜措施 Mulching measure	团聚体粒级 Aggregate size classes/mm						
			>5	2~5	1~2	0.5~1	0.25~0.5	$DR_{0.25}$	<0.25
0~20	CT	NM	46.09b	17.11cd	11.40b	11.70c	4.46d	91.77d	8.23a
		BM	28.81d	24.45a	14.08a	16.34b	8.65b	92.33d	7.67b
	FL30	NM	45.69b	19.43b	14.11a	13.16c	4.76d	94.35b	2.85d
		BM	56.73a	15.89e	10.77b	6.70d	4.26de	97.15a	5.65c
	FL45	NM	29.72d	23.52a	14.69a	19.80a	7.13c	94.87b	5.13c
		BM	41.06c	19.72b	11.47b	14.88b	6.23c	93.37c	6.63b
	FL60	NM	30.68d	16.41de	14.66a	16.24b	15.11a	93.09c	6.91b
		BM	57.50a	17.97c	9.26d	6.38d	3.45e	94.55b	5.45c
	F 值 F value	T	110.88 **	161.37 **	5.28 *	54.55 **	77.67 **	84.18 **	83.77 **
		M	100.71 **	1.72	50.69 **	159.50 **	118.01 **	11.64 **	11.65 **
20~40	CT	T×M	149.62 **	77.47 **	28.46 **	89.33 **	269.93 **	33.95 **	34.16 **
	CT	NM	60.77a	13.65f	7.85d	6.81d	3.68c	92.76ef	7.24ab
		BM	26.55d	22.78ab	14.87a	18.84a	9.55a	92.59f	7.41a
	FL30	NM	37.73c	24.06a	13.88ab	12.04c	6.71b	94.42cd	5.59cd
		BM	52.36b	19.19cd	10.85c	8.87d	4.59c	95.85a	4.15ef
	FL45	NM	41.53c	20.76bc	12.37bc	15.21b	6.78b	95.65b	3.36f
		BM	37.24c	20.40c	12.5bc	13.87bc	9.59a	93.61de	6.39bc
	FL60	NM	40.59c	17.56de	14.27a	15.24b	7.38b	95.03bc	4.97de
		BM	49.42b	16.84e	11.64c	11.62c	4.50c	94.01d	5.99c
40~60	F 值 F value	T	8.29 *	11.78 **	3.35 *	15.04 **	20.51 **	20.87 **	20.87 **
		M	6.42 *	4.88	0.82	2.57	6.29 *	18.59 **	18.59 **
	T×M		53.73 **	67.68 **	32.73 **	37.43 **	31.69 **	33.11 **	32.92 **
	CT	NM	19.80d	25.51a	18.01ab	20.15a	7.91b	91.37d	8.63a
		BM	24.87c	24.51a	16.68abc	19.25a	6.78c	92.09cd	7.92ab
	FL30	NM	34.66a	25.18cd	17.72c	15.5d	4.59d	94.39b	2.36d
		BM	36.55b	21.17cd	15.55bc	13.15bc	7.97b	97.64a	5.61c
	FL45	NM	34.39b	24.04ab	15.54bc	14.61bc	6.43c	95.01b	4.99c
		BM	33.72b	20.32d	18.95a	11.76d	8.10b	92.86c	7.14b
	FL60	NM	25.23c	22.29bc	19.14a	16.32b	10.12a	93.10c	6.90b
		BM	35.18b	20.79cd	15.00c	15.31bc	8.09b	94.38b	5.62c
	F 值 F value	T	72.40 **	20.48 **	14.61 **	45.22 **	120.88 **	37.28 **	37.10 **
		M	0.65	8.67 *	0.26	0.28	12.77 **	41.54 **	40.98 **
	T×M		10.67 **	4.79 *	5.19 *	2.74	15.20 **	27.12 **	26.84 **

2.4 粉垄与覆膜对马铃薯产量和产量构成因素的影响

耕作方式、覆膜措施均可显著改善旱作马铃薯的产量构成(马铃薯大薯、中薯和小薯产量),从而显著提高其商品薯率和马铃薯总产量。而耕作与覆膜交互作用对马铃薯大薯、中薯产量和总产量无显著影响,对马铃薯小薯产量和商品薯率的影响均呈极显著水平。同一耕作方式下,大薯、中薯和总产量均表现为 BM>NM;同一覆膜措施下马铃薯大薯产量表现为 FL45>FL60>FL30>CT,而中薯产量表现为 FL60>FL45>FL30>CT,小薯产量表现为 CT>FL60>FL45>FL30。在所有处理组合中,大薯产量以 FL45×BM 处理最高,中薯产量以 FL60×BM 处理最高,分别较 CT×NM 处理显著增加 45.75%、71.59%,

小薯产量以 CT×NM 处理最高。
耕作方式、覆膜措施对马铃薯总产量影响显著。同一耕作方式下 BM 处理马铃薯总产量较高,而同一覆膜措施下,4 种耕作方式中,FL45 处理马铃薯平均总产量最高,其次是 FL60 和 FL30 处理。在所有处理组合中,FL45×BM 处理的马铃薯产量最高,FL60×BM 处理次之,分别较 CT×NM 处理显著提高 69.69%和 65.04%。商品薯率与马铃薯总产量变化一致,无论是耕作方式、覆膜措施及其交互作用对马铃薯商品薯率均有极显著影响。在所有处理组合中,FL45×BM 处理的商品薯率最高,其次为 FL30×BM 处理,分别较 CT×NM 处理显著提高 15.15%和 14.92%。综上分析发现,FL45×BM 处理对提高马铃薯总产量和商品薯率效果最优。

表 3 各处理的马铃薯产量及商品薯率
Table 3 Potato yield and commercial potato rate of each treatment

耕作方式 Farming method	覆膜措施 Mulching measure	总产量 Total yield /(kg·hm ⁻²)	产量构成 Yield composition/(kg·hm ⁻²)			商品薯率 Commodity rate/%
			大薯 Big tuber	中薯 Middle tuber	小薯 Small tuber	
CT	NM	33170.87d	26880.13d	1612.51c	4678.22a	85.43c
	BM	41532.21cd	35837.68cd	2950.01bc	2744.51b	93.93b
FL30	NM	38706.19cd	34790.17cd	2812.51bc	1103.51c	97.24a
	BM	48524.04abc	43260.22abc	4402.52ab	861.30c	98.18a
FL45	NM	45575.23abc	40947.70abc	3535.02bc	1092.51c	97.56a
	BM	56288.66a	49750.25a	5625.03a	1113.38c	98.38a
FL60	NM	43631.22bcd	38707.69bcd	3840.02ab	1083.51c	97.55a
	BM	54746.40ab	47775.24ab	5675.03a	1296.13c	97.63a
F 值 F value	T	5.74 *	7.60 *	10.84 * *	49.84 * *	64.65 * *
	M	14.57 * *	17.25 * *	11.00 *	24.29 * *	237.34 * *
	T×M	0.05	0.05	0.10	24.90 * *	146.32 * *

3 讨 论

土壤物理性质是土壤功能的重要指标之一,耕作方式是优化土壤物理性质最普通的农业措施,能为作物生长发育创造良好的条件^[19-20]。然而近年来,连年翻耕导致耕层变浅、犁底层坚硬、土壤保水保肥能力下降,同时阻碍了根系的下扎^[21]。相关研究表明,深松结合不同覆膜方式相对于传统耕作可有效降低土壤容重,改善耕层土壤孔隙状况^[6]。本研究结果表明,粉垄覆膜处理相对于传统耕作不覆膜方式,可使土壤容重有不同程度的降低,并显著改善耕层土壤孔隙状况。分析其可能原因主要有 2 个方面:①粉垄耕作能够打破犁底层,显著改善土壤耕层物理结构,使耕层疏松深厚,并显著降低了土壤容重,同时覆膜减少了人畜践踏和雨滴对地表的直接冲击,使耕层土壤孔隙状况得到改善^[22-23]。②土壤团聚体的空间排布和各粒级土壤团聚体的组成与土壤孔隙分布密切相关,闫雷等^[24]发现土壤

孔隙度与 2~5、1~2 mm 粒级团聚体含量呈显著正相关。因此粉垄耕作增加了 2~5、1~2 mm 粒级土壤团聚体含量,从而增加了土壤孔隙度。本试验结果表明,粉垄覆膜方式下,与传统耕作不覆膜相比,耕层土壤>0.25 mm 机械稳定性团聚体数量显著增加。而粉垄覆膜方式下土壤<0.25 mm 机械稳定性团聚体数量较传统耕作显著降低。这是由于:①传统耕作连年翻耕,减少了稳定性胶结剂的产生,使土壤有机质快速矿化^[25],而粉垄能有效提高旱地耕层土壤总有机碳含量^[26]。同时粉垄结合覆膜促进了土壤矿化量碳与各结构指标相关性^[27]。而章征程等^[28]研究表明,土壤大团聚体质量分数与土壤有机碳量呈显著正相关关系,并且有机物质在大团聚体形成中起重要的作用。②耕作方式可影响微团聚体与大团聚体之间的相互转化和再分布,而大团聚体的形成是微团聚体在有机碳作用下相互胶结而成^[29-30]。李荣^[6]和王少博^[31]等认为,深松覆膜相对于传统耕作,使 0~40 cm 土层>0.25 mm 机

械稳定性团聚体数量显著增加,有利于增强土壤结构稳定性,这与本研究结果一致。

已有研究表明^[32],深旋耕(粉垄)能够显著改变土壤水分状况,进而影响土壤贮水量和作物耗水量。何进等^[33]研究指出,玉米深松覆膜的土壤含水率分别比传统耕作高7.8%。蒋发辉等^[23]研究认为,粉垄耕作显著提高了降雨后耕层土壤的贮水量。张绪成等^[34]研究发现,立式深旋松耕较深松和旋耕能显著提高干旱年份土壤有效贮水量,显著优化0~40 cm土层的土壤物理性状和水分特性。侯贤清等^[35]认为,耕作与覆膜交互作用对作物苗期土壤蓄水量有显著影响。本研究发现,耕作方式、覆膜措施以及二者交互作用对土壤贮水量均有显著影响,其中FL60×BM处理马铃薯关键生育期土壤贮水量最高,这是由于粉垄耕作能够有效打破犁底层,疏松深厚耕层,使降雨下渗较深,土壤调蓄水分能力增强。而且粉垄耕作使得土壤表面骨骼颗粒细化,排列规整且紧密,表面光滑和孔隙发达。对水分吸收利用性能增强^[9]。同时粉垄覆膜减少了表土跑墒和地表蒸发,进一步起到了蓄水保墒的作用^[10]。

张莉等^[21]研究结果表明,深旋松耕能在一定程度上改善马铃薯产量构成因素,有利于花后光合产物积累及其向块茎的转运,从而使马铃薯显著增产38.68%。PERVAIZ等^[36]认为,耕作方式对玉米产量无显著影响,而覆膜措施、耕作与覆膜交互作用对玉米产量影响显著。齐智娟等^[15]研究发现,垄作全膜覆盖可以优化耕层土壤水热环境,提高玉米穗行数 and 穗粒数,利于干物质的积累,促进滴灌条件下的玉米产量形成。李铁冰等^[37]发现,粉垄加盖地膜灌浆渐增期灌浆速率优势明显,穗粒数、百粒重和产量显著提高,且耕作深度越深优势越明显。本研究发现,耕作方式、覆膜措施及其二者交互作用均可改善马铃薯产量构成,从而显著提高马铃薯总产量和商品薯率,尤其以FL45×BM处理最为显著。究其原因是粉垄耕作能有效打破犁底层,降低容重,提高孔隙度,疏松增厚耕层,提高有效贮水量^[23, 32],易于调用深层水分,从而提高了土壤供水能力,显著优化了耕层的土壤物理性状和水分特性^[10]。同时覆膜后克服了表土跑墒,进一步改善了土壤水温状况、促进了马铃薯苗期生长,提高了块茎产量^[35, 37]。因此解决了旱作条件下制约马铃薯生长最重要的影响因子,故产量得以提高^[6]。而张绪成等^[32]在西北黄土高原雨养区研究发现,旋耕深度为60cm时,虽改善了土壤水分状况,但促进了马

铃薯花前耗水,使总耗水量增加,对马铃薯块茎形成不利。因此在半干旱旱作区,马铃薯种植的粉垄深度以40 cm为佳,可优化土壤水分环境和耗水过程,显著提高产量^[38-39],这与本研究结果一致。

因此,粉垄耕作方式能够打破犁底层、增加土壤孔隙度,改善土壤物理性状,进而促使水分在土壤中的垂直运移,而覆膜进一步减少了水分蒸发,克服了表土跑墒的缺点,减少了耗水量,提高了土壤贮水量,改善土壤微环境,进而促进作物的水分吸收,提高花后干物质积累量及其向块茎的分配比例,使得大薯产量和中薯产量维持较高水平,最终获得较高的马铃薯总产量。所以,本试验条件下粉垄覆膜是提高宁南山区马铃薯块茎产量的适宜种植模式,但粉垄耕作的增产效果是否受降雨丰缺年份、耕作时间、土壤质地和作物种类等因素的影响仍有待进一步深入研究。

4 结 论

1)与传统耕作相比,粉垄均可有效降低耕层土壤容重,改善土壤孔隙度,以粉垄45 cm处理下效果最好。与传统耕作相比,粉垄耕作可使0~60 cm土层>0.25 mm机械稳定性团聚体数量显著增加。粉垄覆盖地膜有利于0~80 cm土层土壤水分保蓄,其中以粉垄60 cm、45 cm覆膜处理提高水分效果较好。

2)粉垄耕作与覆膜对马铃薯总产量和商品薯率具有显著或极显著影响,在所有处理组合中,粉垄45 cm覆膜处理的马铃薯块茎总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69.69%和15.15%。可见,粉垄结合覆膜措施可显著改善马铃薯耕层土壤结构、水分环境,有利于马铃薯个体和群体发育,其抗旱增产增收效果显著。

参 考 文 献

- [1] 肖国举,仇正脐,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 G J, CHOU Z J, ZHANG F J, et al. Influence of increased temperature on the potato yield and quality in a semiarid district of north-west China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 830-836.
- [2] LI Q, LI H B, ZHANG L, et al. Mulching improves yield and water-use efficiency of potato cropping in China: a meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2018, 221: 50-60.
- [3] 杜茜,闫兴富.宁夏马铃薯产业现状与发展对策[J].中国马铃薯, 2010, 24(2): 125-127.
DU Q, YAN X F. Ningxia potato industry situation and development strategy[J]. Chinese Potato Journal, 2010, 24(2): 125-127.
- [4] 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 R, WANG Y L, WU P N, 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 168-175.
- [5] 侯贤清,李荣.秋耕覆盖对土壤水热肥与马铃薯生长的影响分析[J].农业机械学报,2020,51(12):262-275.
- HOU X Q, LI R.Effects of autumn tillage with mulching on soil water, temperature and nutrient and potato growth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 262-275.
- [6] 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 R, HOU X Q. Effects of different ground surface mulch under sub-soiling on potato yield and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(20): 115-123.
- [7] 侯贤清,李荣,贾志宽,等.西北旱作农田不同耕作模式对土壤性状及小麦产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(5):1146-1157.
- HOU X Q, LI R, JIA Z K, et al. Effects of different tillage practices on soil properties and wheat yields in dry farmland of northwest China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(5): 1146-1157.
- [8] 韦本辉,刘斌,甘秀芹,等.粉垄栽培对水稻产量和品质的影响[J].中国农业科学,2012,45(19):3946-3954.
- WEI B H, LIU B, GAN X Q, et al. Effect of Fenlong cultivation on yield and quality of rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(19): 3946-3954.
- [9] 王世佳,蒋代华,朱文国,等.粉垄耕作对农田赤红壤团聚体结构的影响[J].土壤学报,2020,57(2):326-335.
- WANG S J, JIANG D H, ZHU W G, et al. Effect of deep vertical rotary tillage on aggregate structure in farmland of lateritic red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 326-335.
- [10] 李铁冰,逢焕成,杨雪,等.粉垄耕作对黄淮海北部土壤水分及其利用效率的影响[J].生态学报,2013,33(23):7478-7486.
- LI Y B, PANG H C, YANG X, et al. Effects of deep vertically rotary tillage on soil water and water use efficiency in northern China's Huang-huai-hai region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7478-7486.
- [11] 秦舒浩,张俊莲,王蒂,等.覆膜与沟垄种植模式对旱作马铃薯产量形成及水分运移的影响[J].应用生态学报,2011,22(2):389-394.
- QIN S H, ZHANG J L, WANG D, et al. Effects of different film mulch and ridge-furrow cropping patterns on yield formation and water translocation of rainfed potato [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(2): 389-394.
- [12] 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.
- [13] 吴佳瑞,康建宏,吴娜,等.覆膜对宁南山区马铃薯光合特性和产量的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(4):208-214.
- WU J R, KANG J H, WU N, et al. Effects of film mulching on photosynthetic characteristics and yield of potato in hilly area of southern Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(4): 208-214.
- [14] 吴佳瑞,康建宏,柳强娟,等.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[J].核农学报,2019,33(12):2482-2491.
- WU J R, KANG J H, LIU Q J, et al. Effects of black plastic film mulching on starch accumulation and key enzyme activities of potato tubers in dryland[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(12): 2482-2491.
- [15] 齐智娟,冯浩,张体彬,等.覆膜耕作方式对河套灌区土壤水热效应及玉米产量的影响[J].农业工程学报,2016,32(20):108-113.
- QI Z J, FENG H, ZHANG T B, et al. Effects of mulch and tillage methods on soil water and temperature as well as corn yield in Hetao irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(20): 108-113.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].第3版.北京:中国农业出版社,2000:30-58.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing:China Agriculture Press, 2000: 30-58.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978:83-85.
- Laboratory of Soil Physics,Nanjing Institute of soil, Chinese Academy of Sciences. Determination of soil physical properties [M].Beijing: Science Press,1978:83-85.
- [18] WANG Y J, XIE Z K, MALHI S S, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(3): 374-382.
- [19] MUNKHOLM L J, HECK R J, DEEN B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 127: 85-91.
- [20] XU D, MERMOUD A. Topsoil properties as affected by tillage practices in north China[J]. Soil and Tillage Research, 2001, 60(1/2): 11-19.
- [21] 张莉,翟振,逢博,等.深旋耕改善耕层结构促进马铃薯增产[J].中国土壤与肥料,2017,(4):17-23.
- ZHANG L, ZHAI Z, PANG B, et al. Deep vertically rotary tillage improve soil structure and tuber yield of potato[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017,(4): 17-23.
- [22] 付国占,李潮海,王俊忠,等.残茬覆盖与耕作方式对土壤性状及夏玉米水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2005,(1):52-56.
- FU G Z, LI C H, WANG J Z, et al. Effects of stubble mulch and tillage managements on soil physical properties and water use efficiency of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005,(1): 52-56.
- [23] 蒋发辉,高磊,韦本辉,等.粉垄耕作对红壤理化性质及红薯产量的影响[J].土壤,2020,52(3):588-596.
- JIANG F H, GAO L, WEI B H, et al. Impact of Fenlong tillage on soil physiochemical properties and sweet potato yield in dryland red soil[J]. Soils, 2020, 52(3): 588-596.
- [24] 闫雷,喇乐鹏,董天浩,等.耕作方式对东北黑土坡耕地土壤物理性状及根系垂直分布的影响[J].农业工程学报,2021,37(1):125-132.
- YAN L, LA L P, DONG T H, et al. Soil physical properties and ver-

- tical distribution of root systems affected by tillage methods in black soil slope farmlands in northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 125-132.
- [25] 范如芹,梁爱珍,杨学明,等.耕作方式对黑土团聚体含量及特征的影响[J].中国农业科学,2010,43(18):3767-3775.
- FAN R Q, LIANG A Z, YANG X M, et al. Effects of tillage on soil aggregates in black soils in northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(18): 3767-3775.
- [26] 郑佳舜,陈仕林,胡钧铭,等.粉垄耕作对黏性红壤团聚体稳定性的影响评估[J].土壤通报,2020,51(6):1394-1402.
- ZHENG J S, CHEN S L, HU J M, et al. Evaluation of smash ridging on the influence of aggregates stability in the clay red topsoil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(6): 1394-1402.
- [27] 郑佳舜,胡钧铭,韦翔华,等.绿肥压青对粉垄稻田土壤微生物量碳和有机碳累积矿化量的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(4):691-703.
- ZHENG J S, HU J M, WEI X H, et al. Effects of green manure returning on soil microbial biomass carbon and mineralization of organic carbon in smash ridging paddy field[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(4): 691-703.
- [28] 章征程,林启美,李谟志,等.耕作对河套黄灌区典型盐碱土水稳定性团聚体及有机碳和全氮含量的影响[J].南京农业大学学报,2018,41(6):1085-1092.
- ZHANG Z C, LIN Q M, LI M Z, et al. Effects of cultivation on water-stable aggregates and their organic carbon and nitrogen in typical saline-alkali soil of Hetao Yellow River irrigation region[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2018, 41(6): 1085-1092.
- [29] YODER R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1936, 28(5): 337-351.
- [30] PUGET P, CHENU C, BALESDENT J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates[J]. European Journal of Soil Science, 2000, 51(4): 595-605.
- [31] 王少博,曹亚倩,冯倩倩,等.保护性耕作对棕壤粒径分形特征及碳氮比分布的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(5):792-804.
- WANG S B, CAO Y Q, FENG Q Q, et al. Impacts of conservation tillage on soil particulate composition and distribution of soil carbon and nitrogen in brown soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(5): 792-804.
- [32] 张绪成,马一凡,于显枫,等.旋耕深度对西北黄土高原旱作区土壤水分特性和马铃薯产量的影响[J].作物学报,2021,47(1):138-148.
- ZHANG X C, MA Y F, YU X F, et al. Effects of tillage depth on soil hydrological characteristics and potato yield on northwest Loess Plateau[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(1): 138-148.
- [33] 何进,李洪文,高焕文.中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究[J].农业工程学报,2006,22(10):62-67.
- HE J, LI H W, GAO H W. Subsoiling effect and economic benefit under conservation tillage mode in Northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10): 62-67.
- [34] 张绪成,马一凡,于显枫,等.立式深旋松耕对西北半干旱区土壤水分性状及马铃薯产量的影响[J].草业学报,2018,27(12):156-165.
- ZHANG X C, MA Y F, YU X F, et al. Effects of vertical rotary subsoiling on soil water characteristics and potato tuber yield in a semi-arid area of northwest China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(12): 156-165.
- [35] 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.
- HOU X Q, LI R, MA F, et al. Effects of tillage with mulching during fallow period on physiological ecology in seedling stage and yield of potato in dry-farming areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 263-273.
- [36] PERVAIZ M A, IQBAL M, SHAHZAD K. Effect of mulch on soil physical properties and N, P, K concentration in maize (*Zea mays* L.) shoots under two tillage systems[J]. International Journal of Agriculture & Biology, 2009, 11: 119-124.
- [37] 李轶冰,逢焕成,李华,等.粉垄耕作对黄淮海北部春玉米籽粒灌浆及产量的影响[J].中国农业科学,2013,46(14):3055-3064.
- LI Y B, PANG H C, LI H, et al. Effects of deep vertically rotary tillage on grain filling and yield of spring maize in north Huang-Huai-Hai region [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(14): 3055-3064.
- [38] 张绪成,马一凡,于显枫,等.立式深旋耕作对西北半干旱区马铃薯水肥利用和产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2021,27(2):191-203.
- ZHANG X C, MA Y F, YU X F, et al. Effects of vertically rotary subsoiling on nutrient and water utilization and tuber yield of potato in semi-arid area of northwest China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(2): 191-203.
- [39] 刘江汉,何文寿.粉垄耕作对土壤性质及马铃薯产量的影响[J].东北农业科学,2020,45(2):20-25.
- LIU J H, HE W S. Effects of smash-ridging technology on soil properties and potato yield[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2020, 45(2): 20-25.