

滴灌条件下覆膜热效益及其对马铃薯生长的影响

张友良¹ 王凤新² 聂 唯³ 冯绍元¹

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009; 2. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083;
3. 新津县水务局, 成都 611430)

摘要: 2015 年 4—8 月在甘肃地区和 2017 年 3—7 月在山东地区, 在滴灌条件下对不同薄膜覆盖(透明薄膜, CF; 不覆膜, NF; 黑色薄膜, BF)的覆膜热效应及其对马铃薯生长的影响进行了试验。通过对马铃薯全生育期冠层净辐射、土壤热通量和土壤温度进行自动监测, 对马铃薯块茎分级、产量、水分利用效率进行测量和计算。结果表明: BF 处理的净辐射大于 NF 和 CF 处理, 2015 年 BF 处理在芽条生长期和苗期的净辐射最大值均比 NF 处理高 12%, 2017 年则分别高 22% 和 15%; 2015 年 CF 处理 10 cm 深度处的土壤热通量最大值比 BF 处理和 NF 处理分别高 66% 和 129%, 2017 年则为 57% 和 91%; CF 处理的土壤温度高于 BF 和 NF 处理, 但在块茎形成期和块茎增长期 CF 处理的土壤温度稍低于 BF 和 NF 处理, 2017 年山东地区各处理土壤温度间的差异小于 2015 年甘肃地区; 甘肃地区 CF 处理的耗水明显少于 BF 处理, 并且该地区覆膜的热效应及其对提高马铃薯产量和水分利用效率的影响优于山东地区, 建议甘肃地区采用透明薄膜覆盖马铃薯种植方式。

关键词: 马铃薯; 覆膜; 净辐射; 土壤热通量; 水分利用效率

中图分类号: S274.1; S532 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)12-0252-10 OSID: 

Effects of Film Mulching on Thermal Conditions and Potato Growth under Drip Irrigation

ZHANG Youliang¹ WANG Fengxin² NIE Wei³ FENG Shaoyuan¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China
2. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China
3. Xinjin Water Authority, Chengdu 611430, China)

Abstract: Film mulching can change radiation transfer, increase soil temperature, reduce soil evaporation and so on. Potato has good nutritional value and produce more dietary energy than rice, maize and wheat. Potato has shallow roots and is sensitive to hydrothermal conditions. Field hydrothermal environment can be regulated through the combination of film mulching and drip irrigation. Drip irrigation with film mulching can increase potato yield and water use efficiency and improve potato quality. Optical properties of film are important factors affecting field thermal conditions and potato growth. The effects of film mulching on field thermal conditions and potato growth are also different in different regions with different climatic conditions. The experiments were conducted in Gansu Province from April to August 2015 and Shandong Province from March to July 2017, respectively. Effects of different film mulching (clear film, CF; no film, NF; black film, BF) on heat conditions and potato growth under drip irrigation were studied. Canopy net radiation, soil heat flux and soil temperature were monitored automatically during the whole growth period. Potato yield, tuber grade, water consumption and water use efficiency were measured. The results suggested that net radiation of BF treatment was greater than that of NF and CF treatments, while net radiation of CF treatment might be higher or lower than that of NF treatment. The maximum net radiation of BF treatment was 12% greater than that of NF treatment during sprout

收稿日期: 2020-08-26 修回日期: 2020-09-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51809225)、江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20180929)和中国博士后科学基金面上项目(2019M651977)

作者简介: 张友良(1987—),男,讲师,博士,主要从事农业水土环境与生态调控研究, E-mail: youliangzhang@yzu.edu.cn

通信作者: 王凤新(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事农业节水机理及水资源与水环境研究, E-mail: fxinwang@cau.edu.cn

development stage and seedling stage in 2015 and 22% and 15% greater than that of NF treatment in 2017, respectively. The differences of soil heat flux and soil temperature between treatments were great during sprout development stage and seedling stage, decreased during tuber initiation stage and tuber bulking stage, and increased during maturity stage. The maximum soil heat flux at 10 cm soil depth of CF treatment was 66% and 129% greater than that of BF and NF treatments in 2015, respectively, and it was 57% and 91% greater than that of BF and NF treatments in 2017, respectively. The soil temperature of CF treatment was greater than that of BF and NF treatments, while it might be lower than that of BF and NF treatments during tuber initiation stage and tuber bulking stage. In 2015, the daily maximum soil temperatures at 10 ~ 50 cm soil depths of CF treatment were 29% greater than that of BF treatment, and 31% and 29% higher than that of NF treatment during sprout development stage and seedling stage, respectively. In 2017, the daily maximum temperatures at 10 ~ 50 cm soil depths of CF treatment were 22% and 4% greater than that of BF treatment, and 21% and 9% greater than that of NF treatment during sprout development stage and seedling stage, respectively. The difference of soil temperature among different treatments in Shandong Province in 2017 was smaller than that in Gansu Province in 2015. Film mulching significantly improved potato yield and water use efficiency in Gansu Province and the evapotranspiration of CF treatment was significantly lower than that of BF treatment. However, film mulching did not significantly improve potato yield and water use efficiency in Shandong Province in 2017. The evapotranspiration of CF treatment was lower than that of BF treatment in Gansu Province. The effects of film mulching on thermal conditions and potato yield and water use efficiency were more remarkable in Gansu Province than that in Shandong Province. Clear film mulching was favorable for potato cultivation in Gansu Province.

Key words: potato; film mulching; net radiation; soil heat flux; water use efficiency

0 引言

覆膜广泛应用于种植棉花^[1]、玉米^[2-4]、马铃薯^[5-6]等作物,它可以改变辐射的传输过程^[7-9]、提高土壤温度^[10-12]、减少土壤蒸发^[13-14]、改善根系养分吸收^[15]等。膜下滴灌是滴灌与覆膜的有机结合,采用该技术可以调控田间地上、地下水热环境,进而利于作物出苗^[16]、促进作物生长^[17]、提高产量和水分利用效率^[18-19]。

马铃薯是世界第四大粮食作物^[20],相较于水稻、玉米和小麦,马铃薯可以利用相同的水分生产出更多的膳食能量^[21],并且马铃薯是促进健康的抗氧化剂的来源,具有很好的营养价值^[22]。但是,马铃薯根系浅,对水热环境反应较为敏感^[23-25]。调控田间水热环境是马铃薯生产中需要解决的难题。膜下滴灌是调控马铃薯田间水热环境较好的选择,相关研究已证明,膜下滴灌可以提高马铃薯产量和水分利用效率、改善马铃薯品质^[6,11,26-27]。

薄膜光学性质是影响覆膜热效益的关键因素,不同薄膜产生的热效益不同,对作物生长的影响也不同^[28-29]。已有研究表明,黑色薄膜的太阳辐射吸收率大于透明薄膜,其冠层净辐射大于透明薄膜^[28,30];透明薄膜的太阳辐射透射率大于黑色薄膜,因而更有利于加热土壤,透明薄膜覆盖的土壤温度和土壤热通量大于黑色薄膜^[29]。但也有研究发现,黑色薄膜覆盖的土壤温度和土壤热通量高于透

明薄膜^[31],这可能因为不同研究薄膜与土壤之间的间隙不同,间隙小时有利于热量向土壤传输,使得黑色薄膜覆盖下的土壤温度和土壤热通量较大^[7,32]。不同薄膜覆盖对作物的影响也不相同,有研究表明,黑色薄膜覆盖比透明薄膜覆盖更有利于产量提高^[33-34],但也有研究认为,透明薄膜对提高产量优于黑色薄膜^[35],这主要因为不同地区、不同气候条件下的薄膜覆盖热效应不同^[29]。因此,有必要进一步研究不同地区透明薄膜和黑色薄膜在膜下滴灌条件下产生的热效应及其对马铃薯生长的影响。本文研究透明薄膜和黑色薄膜在甘肃和山东地区的覆盖热效应及其对马铃薯生长的影响,以期为这两个地区膜下滴灌马铃薯种植提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

2015 年 4—8 月,在甘肃省武威市凉州区中国农业大学石羊河实验站(北纬 37°52',东经 102°51',海拔 1 581 m)进行田间试验。该试验区属于典型温带大陆性气候,其光热资源丰富,利于农作物生长,其年日照时数大于 3 000 h,大于 0℃ 积温超过 3 550℃,多年平均气温为 8℃,无霜期大于 150 d。但试验区水资源紧缺,蒸发量大且降雨稀少,多年平均 A 类蒸发皿水面蒸发量接近 2 000 mm,年降雨量为 164 mm。土壤质地主要为砂壤土,0 ~ 100 cm 深度土壤平均干容重为 1.53 g/cm³。

2017 年 3—7 月,在山东省日照市岚山区中国农业大学特色马铃薯优质高产试验示范基地(北纬 35°25′,东经 118°59′,海拔 131 m)进行田间试验。该试验区属于暖温带湿润季风气候,其年均日照时数为 2 533 h,多年平均气温为 13.2℃,无霜期 213 d,多年平均降雨量为 897 mm。土壤质地主要为砂壤土,0~60 cm 深度土壤平均干容重为 1.50 g/cm³。

1.2 试验设计

试验设置 3 种薄膜覆盖处理:透明薄膜(CF)、不覆膜(NF)和黑色薄膜(BF)。每个处理设 3 个重复,共 9 个小区,小区为完全随机布置。灌溉方式均为地表滴灌,滴灌系统采用支管加辅管,每个小区由压力表、闸阀和水表控制滴灌系统的工作压力和灌水量。滴灌带滴头流量为 1.38 L/h,流量变异系数为 1.99%,滴灌带间距为 20 cm,壁厚 0.4 mm,直径 16 mm。滴灌系统安装完成后,覆盖薄膜,薄膜厚度为 0.008 mm。薄膜覆盖为全覆盖,垄沟位置覆盖 2~5 cm 厚的土,用于固定薄膜。垄沟两端设置小埂,防止径流流出小区外。

灌水开始时间由负压计控制。每个处理的两个小区安装有负压计,测量滴灌带正下方 20 cm 土壤深度处的土壤基质势,当负压计读数平均值达到 -25 kPa 时开始灌溉,灌水定额计算式为

$$m = h(\theta_a - \theta_b)p/\eta \tag{1}$$

式中 m ——灌水定额,mm
 h ——计划湿润层深度,取 500 mm
 θ_a ——灌水后土壤含水率(田间持水率),2015 年为 0.27 cm³/cm³,2017 年为 0.26 cm³/cm³
 θ_b ——灌水前土壤含水率(田间持水率的 70%),cm³/cm³
 p ——滴灌湿润比,2015 年为 55%,2017 年为 50%
 η ——滴灌系统灌溉水利用系数,取 0.97

1.3 试验材料

2015 年马铃薯品种为克新 1 号,采用起垄种植,每个小区 7 垄,垄宽 0.8 m,垄高 0.2 m,小区长 6 m,宽 5.6 m,面积 33.6 m²。将马铃薯种薯(原种脱毒)切块种植,株距为 0.3 m。马铃薯种植时间为 4 月 15 日,收获时间为 8 月 20 日,生育期划分见表 1。施肥量为氮肥(N)185 kg/hm²、磷肥(P₂O₅)231 kg/hm²、钾肥(K₂O)117 kg/hm²。

2017 年马铃薯品种为荷兰十五号,采用起垄种植,一垄双行,每个小区 8 垄,垄宽 0.9 m,垄高 0.2 m,宽行行距 0.6 m,窄行行距 0.3 m,小区长 6.4 m,宽 7.2 m,面积 46.08 m²。将马铃薯种薯(原种脱毒)

表 1 2015 年和 2017 年马铃薯生育期划分
Tab. 1 Division of potato growth stage in 2015 and 2017

生育期	日期	
	2015 年	2017 年
芽条生长期	4 月 15 日—5 月 6 日	3 月 14 日—4 月 16 日
苗期	5 月 7—27 日	4 月 17 日—5 月 9 日
块茎形成期	5 月 28 日—6 月 10 日	5 月 10—18 日
块茎增长期	6 月 11 日—8 月 4 日	5 月 19 日—6 月 7 日
成熟期	8 月 5—20 日	6 月 8 日—7 月 9 日

切块种植,株距为 0.4 m。马铃薯种植时间为 3 月 14 日,收获时间为 7 月 9 日,生育期划分见表 1。施肥量为氮肥(N)147 kg/hm²、磷肥(P₂O₅)82 kg/hm²、钾肥(K₂O)385 kg/hm²。

1.4 测定项目与方法

气象数据:利用标准气象站监测太阳总辐射、压强、风速、大气温度、相对湿度、降雨等,气象站安装高度为距地面 2 m。

冠层净辐射和土壤热通量:分别于每个处理的一个小区安装净辐射计(NR Lite2 型,Kipp&Zonen,荷兰),监测冠层上方的净辐射,安装高度为距垄顶 1 m。分别于每个处理的一个小区,在距垄顶 5 cm 土壤深度位置安装土壤热通量板(HFP01 型,Hukseflux,荷兰),监测土壤热通量。将净辐射计和土壤热通量板连接于数据采集器(CR1000 型,Campbell Scientific Inc.,美国),采集数据间隔为 10 s,计算并存储每 10 min 的数据。

土壤温度:分别于每个处理的一个小区,利用土壤水分温度传感器(FDS120 型,北京联创思源测控技术有限公司生产)监测距垄顶 10、20、30、50 cm 深度处的土壤温度,每个小区的传感器连接到数据采集器(SMC6108 型,北京联创思源测控技术有限公司生产),采集数据间隔为 10 s,计算并存储每 10 min 的数据。

耗水量:利用水量平衡法计算马铃薯耗水量,其计算公式为

$$ET_c = I + P - \Delta S - R - D \tag{2}$$

式中 ET_c ——马铃薯耗水量,mm
 I ——灌水量,mm P ——降雨量,mm
 ΔS ——土壤储水量变化量,mm
 R ——地表径流量,mm
 D ——根区以下土壤深层渗漏量,mm

其中土壤储水量变化量 ΔS 采用烘干法测量,在马铃薯种植前和收获后,分别在每个小区的垄顶、垄侧、垄沟利用土钻取土,取土深度为:0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~50 cm、50~70 cm、70~90 cm,将土样装入铝盒称量,然后用烘箱在 105℃

烘干至恒定质量并称量,即可得土壤质量含水率,将其乘以土壤干容重即得土壤体积含水率。因该地区降雨量小且灌溉方式为滴灌,灌水量小,忽略地表径流量和土壤深层渗漏量。

株高:马铃薯植株高度是指地上茎基部到生长点的距离。在每个小区标记 10 株马铃薯测量其株高,用钢卷尺每 7d 测一次,在马铃薯生长旺盛期加测,直至马铃薯叶片开始衰老倒伏。

产量与块茎分级:收获时取每个小区的中间 3 垄马铃薯测量产量。每个小区 2015 年取 10 株、2017 年取 30 株马铃薯的块茎进行块茎分级。

1.5 数据处理

对不同处理的植株株高、块茎个数、块茎质量、耗水量、产量进行方差分析,其处理的显著性差异由 *F* 检验确定,处理间显著性差异由新复极差法 (Duncan 多重比较法) 确定。采用统计软件 SPSS (version 20 for Windows, SPSS Inc., 美国) 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 覆膜对净辐射的影响

不同薄膜覆盖处理马铃薯各生育期净辐射典

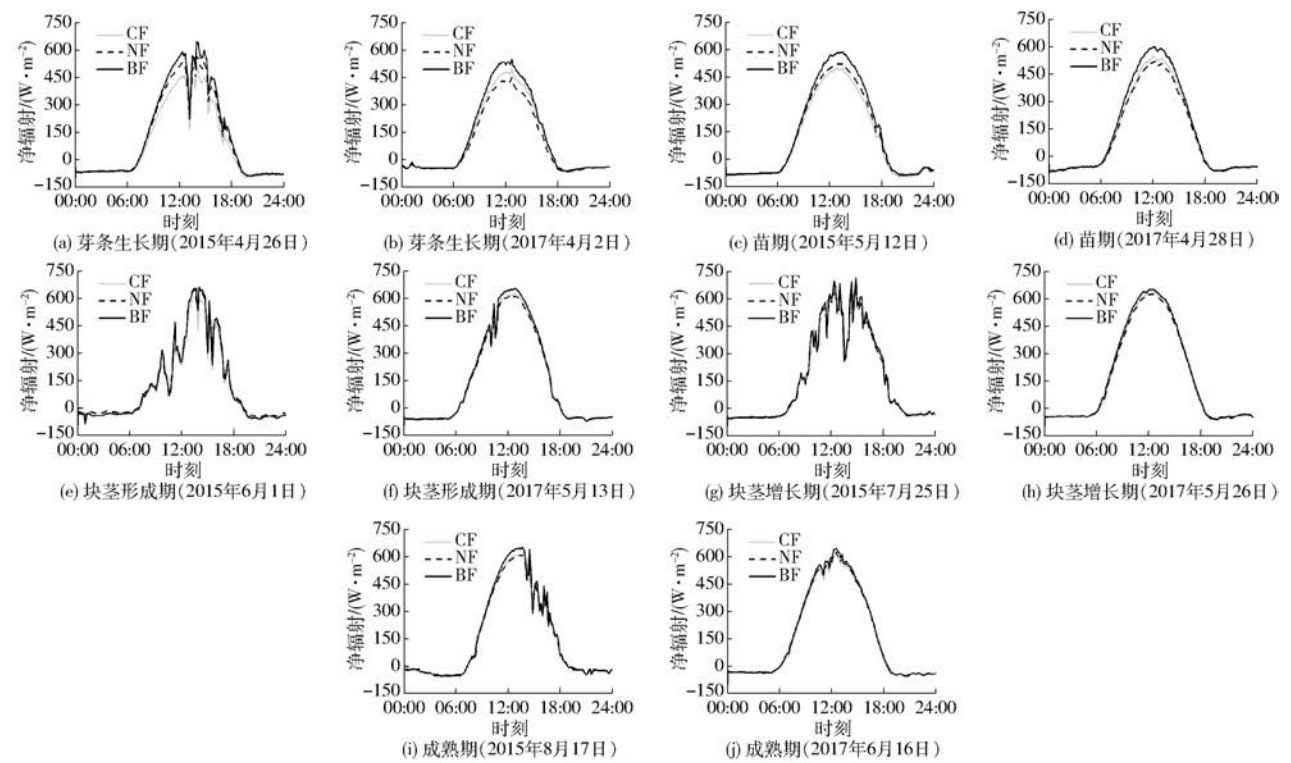


图 1 不同薄膜覆盖处理马铃薯各生育期净辐射典型天日变化曲线

Fig. 1 Typical diurnal variations of net radiation of different mulching treatments in different potato growth stages

2.2 覆膜对土壤热通量的影响

不同薄膜覆盖处理马铃薯各生育期 10 cm 深度处土壤热通量典型天日变化如图 2 所示,总体上,在

型天日变化如图 1 所示,总体上,覆膜对净辐射的影响白天大于夜晚,生育前期大于生育后期。2015 年和 2017 年的试验都表明,BF 处理的净辐射大于 CF 和 NF 处理。CF 处理的净辐射在 2015 年的芽条生长期、苗期、块茎形成期小于 NF 处理,生育期后期差异不大,而在 2017 年除成熟期外,其他生育期高于 NF 处理。2015 年各处理各典型天在 12:40—14:50 达到净辐射最大值,各处理达到最大值的时间差异不大,在芽条生长期、苗期、块茎形成期、块茎增长期和成熟期 BF 处理的最大净辐射比 NF 处理分别高 12%、12%、1%、6%、7%,比 CF 处理分别高 26%、18%、8%、5%、5%;在芽条生长期、苗期和块茎形成期 CF 处理比 NF 处理分别低 11%、5%、6%。2017 年各处理各典型天在 12:00—12:50 达到净辐射最大值,各处理达到最大值的时间差异不大,在芽条生长期、苗期、块茎形成期、块茎增长期和成熟期 BF 处理的最大净辐射比 NF 处理分别高 22%、15%、6%、3%、3%,比 CF 处理分别高 11%、9%、4%、1%、5%;在芽条生长期、苗期、块茎形成期、块茎增长期 CF 处理比 NF 处理分别高 10%、5%、1%、2%,而成熟期 CF 处理比 NF 处理稍低 (2%)。

生育前期 (芽条生长期和苗期) 各处理 10 cm 深度处白天的土壤热通量 CF 处理最大,晚上则最低,随着冠层生长,生育中期各处理土壤热通量差异减小,随

着冠层衰老,成熟期各处理的土壤热通量差异逐渐增大。在生育前期,10 cm 深度处土壤热通量最大值 2015 年 CF 处理比 BF 和 NF 处理分别高 66% 和 129%,2017 年则为 57% 和 91%;土壤热通量最小

值 2015 年 CF 处理比 BF 和 NF 处理分别低 57% 和 68%,2017 年土壤热通量差异较小。BF 处理的土壤热通量在生育期白天总体上大于 NF 处理,但晚上差异较小。

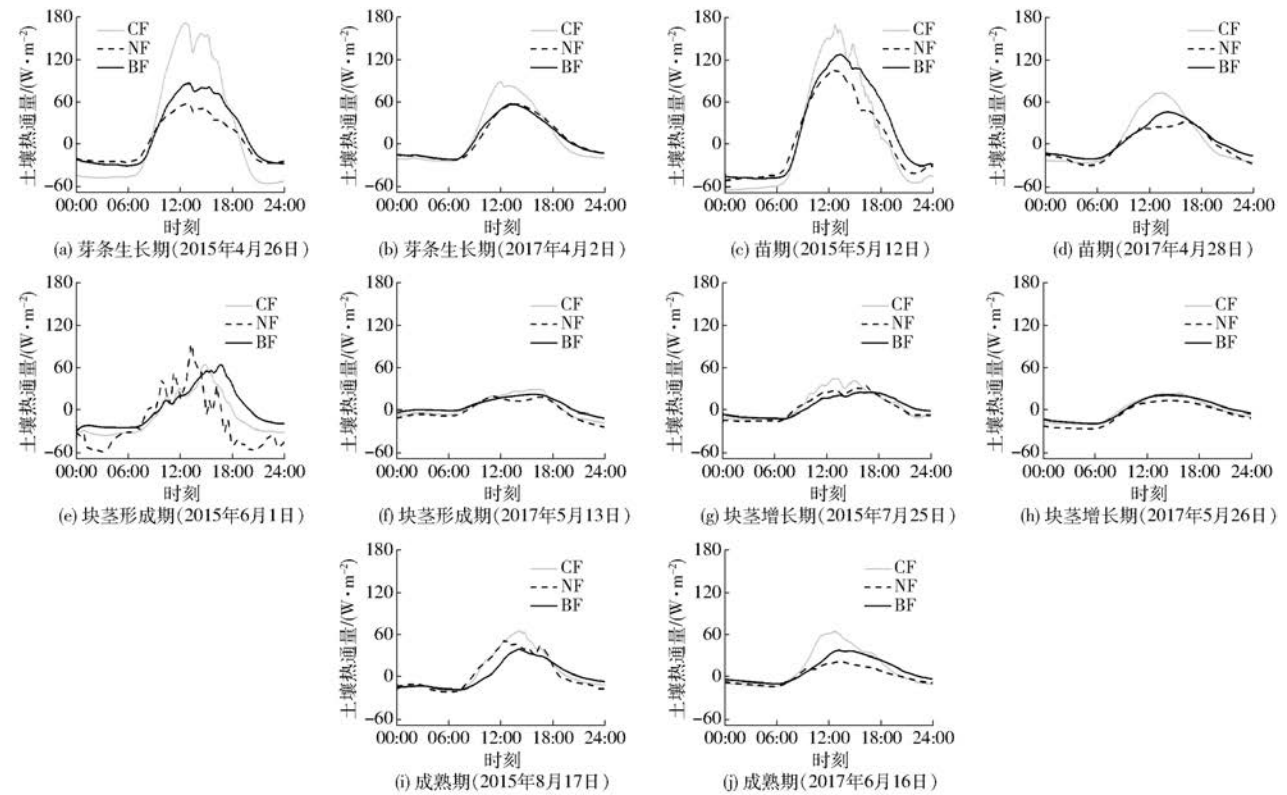


图2 不同薄膜覆盖处理马铃薯各生育期 10 cm 深度处土壤热通量典型天日变化曲线

Fig.2 Typical diurnal variation of soil heat flux at 10 cm soil depth of different mulching treatments in different potato growth stages

2.3 覆膜对土壤温度的影响

2015 年和 2017 年不同薄膜覆盖处理马铃薯各生育期不同深度处土壤温度典型天日变化如图 3、4 所示,各处理不同生育期 and 不同深度的土壤温度变化趋势一致,在生育前期(芽条生长期和苗期)10 ~ 30 cm 深度土壤温度日变化随气温而变化,但在 50 cm 深度土壤温度几乎不随气温波动,随着冠层生长在生育期中期 10 ~ 30 cm 深度土壤温度日变化随气温变化减小,而在成熟期随着冠层衰老,10 ~ 30 cm 深度土壤温度日变化随气温变化逐渐增大。

总体上,各处理土壤温度随冠层生长而差异减小,随冠层衰老而差异增加。CF 处理的土壤温度高于 BF 和 NF 处理,生育前期差异最大,生育中期差异减小,在生育中期 CF 处理的土壤温度甚至比 BF 和 NF 处理稍低。2015 年,芽条生长期和苗期 CF 处理 10 ~ 50 cm 土壤深度处的日最大温度比 BF 处理高 29%,比 NF 处理分别高 31% 和 29%,BF 处理芽条生长期比 NF 处理高 2% 而苗期相同;两生育期 CF 处理 10 ~ 50 cm 土壤深度处的日最低土壤温度比 BF 处理分别高 13% 和 15%,比 NF 处理分别高 16% 和 22%,BF 处理比 NF 处理分别高 3% 和 7%。

2017 年各处理土壤温度间的差异小于 2015 年。2017 年,芽条生长期和苗期 CF 处理 10 ~ 50 cm 土壤深度处的日最大温度比 BF 处理分别高 22% 和 4%,比 NF 处理分别高 21% 和 9%,BF 处理比 NF 处理分别低 1% 和高 5%;两生育期 CF 处理 10 ~ 50 cm 土壤深度处的日最低土壤温度比 BF 处理分别高 15% 和 3%,比 NF 处理分别高 19% 和 4%,BF 处理比 NF 处理分别高 5% 和 2%。

2.4 覆膜对块茎分级的影响

不同薄膜覆盖处理马铃薯块茎分级如图 5(图中不同小写字母表示处理间差异显著, $P < 0.05$)所示,总体上,CF 处理的大块茎($M \geq 300$ g, M 为块茎质量)质量和个数都大于 BF 和 NF 处理,BF 处理的中等块茎(300 g $> M \geq 100$ g)质量和个数都大于 CF 和 NF 处理,NF 处理的小块茎($M < 100$ g)质量和个数大于 BF 和 CF 处理,只有 2015 年覆膜处理大块茎个数与不覆膜处理之间存在显著性差异。例如,2015 年 BF 和 CF 处理大块茎质量(个数)比 NF 处理分别大 60%(67%)和 78%(73%),而 2017 年 BF 处理的大块茎质量(个数)比 NF 处理小 12%(10%),CF 处理比 NF 处理大 9%(10%)。

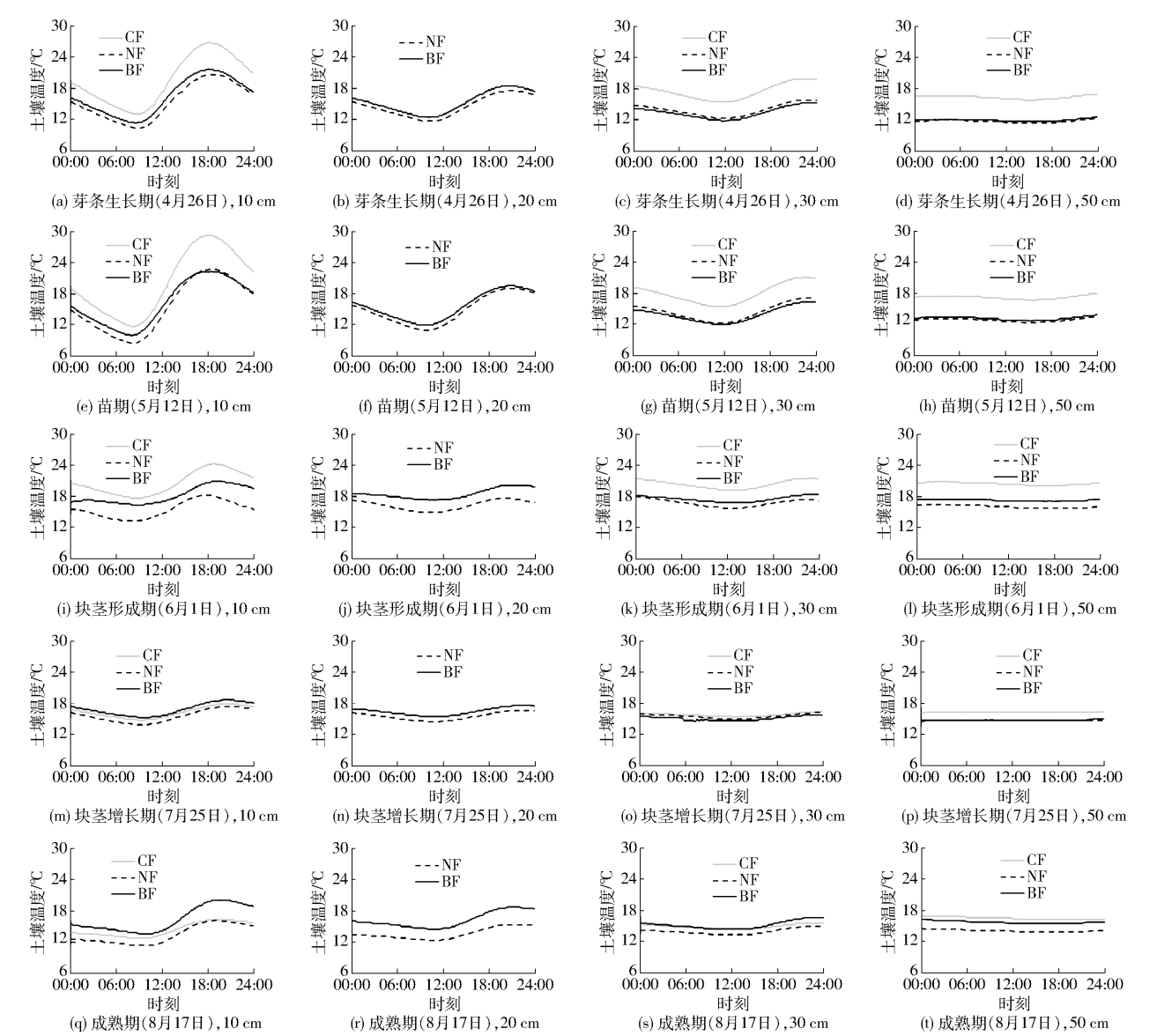


图 3 2015 年甘肃地区不同薄膜覆盖处理马铃薯各生育期不同深度处土壤温度典型天日变化曲线

Fig. 3 Typical diurnal variations of soil temperature at different depths of different mulching treatments in 2015 in different potato growth stages

2.5 覆膜对耗水量、产量及水分利用效率的影响

不同薄膜覆盖处理马铃薯全生育期耗水量、产量和水分利用效率如表 2、3 所示,2015 年和 2017 年不同处理的耗水量、产量和水分利用效率规律不一致。2015 年覆膜处理的灌水量和耗水量少于不覆膜处理,而 2017 年结果则相反,其中 2015 年 CF 和 BF 处理的耗水量比 NF 处理分别少 13% 和 6%,而 2017 年 CF 和 BF 处理的耗水量比 NF 处理分别多 5% 和 4%。2015 年 BF 处理的耗水量显著高于 CF 处理。2015 年 CF 和 BF 处理的马铃薯产量比 NF 处理分别多 32% 和 33%,且存在显著性差异,而 2017 年各处理的产量没有显著性差异,CF 和 BF 处理的产量比 NF 处理分别少 4.08% 和 4.02%。2015 年 CF 和 BF 处理马铃薯水分利用效率显著高于 NF 处理(分别高 51% 和 42%),而 2017 年各处理间没

有显著性差异。

3 讨论

3.1 覆膜对净辐射、土壤热通量及土壤温度的影响

覆膜通过影响水热在土壤-作物-大气系统的传输而影响净辐射、土壤热通量及土壤温度的时空分布。不同薄膜材料由于其光学性质不同而影响水热传输,进而影响净辐射、土壤热通量和土壤温度^[17,30-31]。生育前期影响净辐射、土壤热通量和土壤温度的因素主要是薄膜光学性质^[36]。本研究中随着冠层生长,裸露的薄膜面积减少,覆膜的热效应减小,而生育后期随着冠层衰老,裸露的薄膜面积增大,覆膜的热效应逐渐增大。因此,生育前期(芽条生长期和苗期)不同处理净辐射、土壤热通量和土壤温度的差异大,生育中期(块茎形成期和块茎增

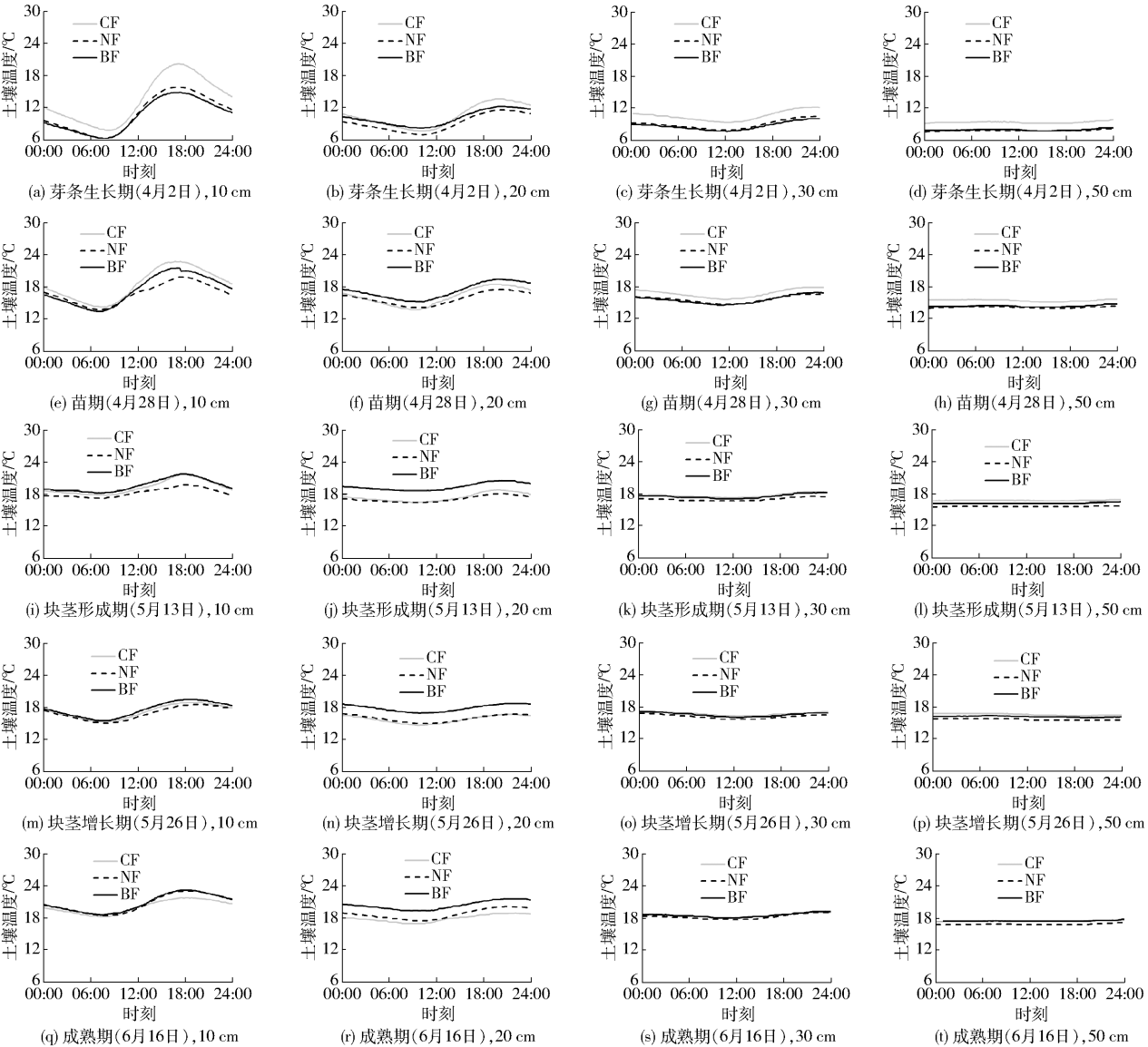


图4 2017年山东地区不同薄膜覆盖处理马铃薯各生育期不同深度处土壤温度典型天日变化曲线

Fig. 4 Typical diurnal variations of soil temperature at different soil depths of different mulching treatments in 2017 in different potato growth stages

长期)差异减小,成熟期差异逐渐增大。

黑色薄膜由于其辐射吸收率大于透明薄膜和不覆膜,导致黑色薄膜处理的净辐射大于透明薄膜和不覆膜处理^[28,31]。透明薄膜处理由于其辐射反射率大于裸土,其净辐射低于不覆膜^[17]。本研究 BF 处理的净辐射高于 CF 和 NF 处理,尤其是在马铃薯芽条生长期和苗期。但是 CF 处理的净辐射在 2015 年低于 NF 处理,这与 FAN 等^[17]的研究结果一致。但是 2017 年 CF 处理的净辐射高于 NF 处理,这主要是因为 NF 处理的净辐射受土壤质地及土壤含水率的影响,从而导致不同地区 CF 处理和 NF 处理净辐射的差异不同。透明薄膜相较于黑色薄膜其辐射透射率大,白天 CF 处理的土壤热通量和土壤温度高于 BF 处理,而 BONACHELA 等^[31]的研究结果表明,CF 处理的土壤热通量和土壤温度低于 BF 处

理,这主要是由于薄膜与土壤之间的空隙影响薄膜与土壤之间的热传输导致的^[7]。覆膜相较于不覆膜可以减少蒸发潜热,从而提高土壤温度^[7,37]。本研究表明覆膜可以提高土壤热通量和土壤温度,并且 CF 的增温效果优于 BF,2015 年甘肃地区的增温效果优于 2017 年山东地区。

3.2 覆膜对马铃薯块茎分级、产量、耗水量及水分利用效率的影响

覆膜能增温保墒^[38-39],促进作物生长,增加产量、改善品质和提高水分利用效率^[35,40-41]。但在不同地区覆膜的热效应及其对作物的影响也不一样^[29]。2015 年,甘肃地区 BF 和 CF 处理的大块茎 ($M \geq 300$ g) 高于 NF 处理,但是 2017 年山东地区 CF 和 BF 处理与 NF 处理相差不多,甚至少于 NF 处理。这主要是由于在甘肃地区覆膜热效应比山东地

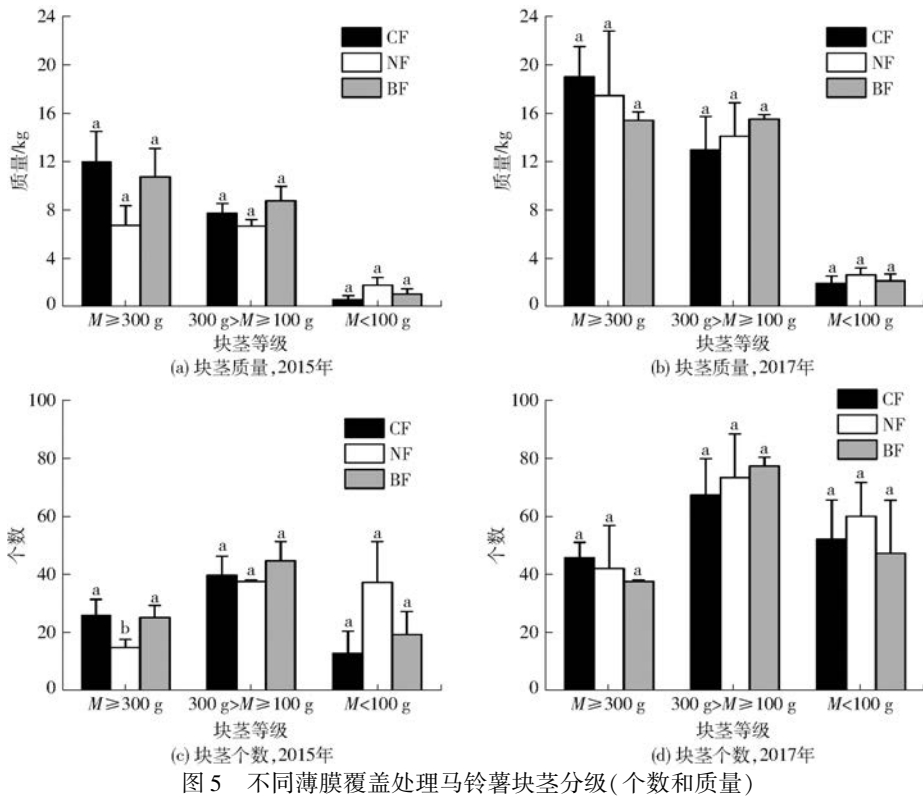


图 5 不同薄膜覆盖处理马铃薯块茎分级(个数和质量)

Fig. 5 Potato tuber grade (number and mass) of different mulching treatments

表 2 不同薄膜覆盖处理马铃薯全生育期耗水量						
Tab. 2 Evapotranspiration during whole potato growth stage of different mulching treatments						
年份	处理	降雨量	灌水量	土壤储水量变化量	土壤深层渗漏量	耗水量
2015	CF	124	344	-10	0	478 ^b
	NF	124	392	-32	0	548 ^a
	BF	124	366	-27	0	517 ^a
2017	CF	196	276	1	0	471 ^a
	NF	196	260	6	0	450 ^b
	BF	196	276	2	0	470 ^a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

表 3 不同薄膜覆盖处理马铃薯产量和水分利用效率						
Tab. 3 Potato yield and water use efficiency of different mulching treatments						
年份	处理	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	耗水量/ mm	水分利用效率/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)		
2015	CF	81 968 ^a	478 ^b	171 ^a		
	NF	62 191 ^b	548 ^a	113 ^b		
	BF	82 704 ^a	517 ^a	160 ^a		
2017	CF	59 389 ^a	471 ^a	126 ^a		
	NF	61 913 ^a	450 ^b	138 ^a		
	BF	59 426 ^a	470 ^a	126 ^a		

区明显。2015 年不覆膜处理的耗水多于 BF 和 CF 处理,但 2017 年则是不覆膜处理的耗水少于覆膜处理,WANG 等^[5]研究发现,不同地区覆膜处理与不覆膜处理耗水存在差异,这主要是因为甘肃地区

降雨少蒸发量大导致不覆膜处理的耗水增加。2015 年 BF 和 CF 处理的马铃薯产量和水分利用效率显著高于 NF 处理,这与 YANG 等^[42]的研究结果一致。BF 处理和 CF 处理的马铃薯产量和水分利用效率则没有显著性差异,这与赵爱琴等^[43]基于 Meta-analysis 的不同覆膜颜色对马铃薯产量影响的研究一致。但是 2017 年覆膜处理与不覆膜处理的产量和水分利用效率都没有显著性差异。这表明覆膜在甘肃地区可以显著提高马铃薯产量和水分利用效率,且透明薄膜可以减少马铃薯耗水;在山东地区覆膜对于马铃薯产量和水分利用效率的影响不显著,这可能是由于山东地区相对甘肃地区更暖和,马铃薯生长受温度胁迫影响较小,因而覆膜的热效应不显著。

4 结论

(1)BF 处理的净辐射大于 NF 和 CF 处理,CF 处理的净辐射可能高于、也可能低于 NF 处理。2015 年 BF 处理在芽条生长期和苗期的净辐射最大值均比 NF 处理高 12%,2017 年则分别高 22% 和 15%。

(2)各处理土壤热通量和土壤温度的差异在马铃薯芽条生长期和苗期最大,在块茎形成期和块茎增长期减小,在成熟期又逐渐增大。2015 年,CF 处理 10 cm 深度处的土壤热通量最大值比 BF 处理和

NF 处理分别高 66% 和 129%, 2017 年则分别为 57% 和 91%。CF 处理的土壤温度高于 BF 和 NF 处理,但在块茎形成期和块茎增长期 CF 处理的土壤温度稍低于 BF 和 NF 处理,2017 年山东地区各处理土壤温度间的差异小于 2015 年甘肃地区。

(3)2015 年甘肃地区覆膜可以显著提高马铃薯

产量和水分利用效率,CF 处理的耗水显著低于 BF 处理,但 2017 年山东地区覆膜对提高马铃薯产量和水分利用效率没有显著影响。甘肃地区覆膜的热效应对提高马铃薯产量和水分利用效率的影响显著优于山东地区,建议甘肃地区采用透明薄膜覆盖马铃薯种植方式。

参 考 文 献

- [1] ZHOU S Q, WANG J, LIU J X, et al. Evapotranspiration of a drip-irrigated, film-mulched cotton field in Northern Xinjiang, China[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(8): 1169–1178.
- [2] QIN S J, LI S E, KANG S Z, et al. Can the drip irrigation under film mulch reduce crop evapotranspiration and save water under the sufficient irrigation condition? [J]. Agricultural Water Management, 2016, 177: 128–137.
- [3] 赵引,毛晓敏,段萌. 覆膜和灌水量对农田水热动态和制种玉米生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 275–284. ZHAO Yin, MAO Xiaomin, DUAN Meng. Effects of film mulching and irrigation amount on farmland water-heat dynamics and growth of seed-maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 275–284. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180832&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.032. (in Chinese)
- [4] 李仙岳,冷旭,张景俊,等. 干旱区降解地膜覆盖农田硝态氮迁移与利用特征研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 294–303. LI Xianyue, LENG Xu, ZHANG Jingjun, et al. Movement and utilization of nitrate nitrogen under biodegradable film mulching in arid area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 294–303. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200733&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.033. (in Chinese)
- [5] WANG F X, FENG S Y, HOU X Y, et al. Potato growth with and without plastic mulch in two typical regions of Northern China [J]. Field Crops Research, 2009, 110: 123–129.
- [6] WANG F X, WU X X, SHOCK C C, et al. Effects of drip irrigation regimes on potato tuber yield and quality under plastic mulch in arid Northwestern China[J]. Field Crops Research, 2011, 122: 78–84.
- [7] HAM J M, KLUITENBERG G J. Modeling the effect of mulch optical properties and mulch-soil contact resistance on soil heating under plastic mulch culture[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1994, 71(3–4): 403–424.
- [8] 吴从林,黄介生,沈荣开. 地膜覆盖条件下 SPAC 系统水热耦合运移模型的研究[J]. 水利学报, 2000, 31(11): 89–96. WU Conglin, HUANG Jiesheng, SHEN Rongkai. A model of heat and water flow in SPAC under transparent polyethylene mulch [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 31(11): 89–96. (in Chinese)
- [9] DING R S, KANG S Z, LI F S, et al. Evapotranspiration measurement and estimation using modified Priestley–Taylor model in an irrigated maize field with mulching[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 168: 140–148.
- [10] FILIPOVIĆ V, ROMIĆ D, ROMIĆ M, et al. Plastic mulch and nitrogen fertigation in growing vegetables modify soil temperature, water and nitrate dynamics: experimental results and a modeling study[J]. Agricultural Water Management, 2016, 176: 100–110.
- [11] SUBRAHMANYAN K, VEERAMANI P, HARISUDAN C. Heat accumulation and soil properties as affected by transparent plastic mulch in Blackgram (*Vigna mungo*) doubled cropped with Groundnut (*Arachis hypogaea*) in sequence under rainfed conditions in Tamil Nadu, India[J]. Field Crops Research, 2018, 219: 43–54.
- [12] 张治,田富强,钟瑞森,等. 新疆膜下滴灌棉田生育期地温变化规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 44–51. ZHANG Zhi, TIAN Fuqiang, ZHONG Ruisen, et al. Spatial and temporal pattern of soil temperature in cotton field under mulched drip irrigation condition in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 44–51. (in Chinese)
- [13] LI F M, WANG J, XU J Z, et al. Productivity and soil response to plastic film mulching durations for spring wheat on entisols in the semiarid Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 78(1): 9–20.
- [14] ZHANG Y L, WANG F X, SHOCK C C, et al. Influence of different plastic film mulches and wetted soil percentages on potato grown under drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2017, 180: 160–171.
- [15] KASIRAJAN S, NGOUAJIO M. Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2012, 32: 501–529.
- [16] LIANG S M, REN C, WANG P J, et al. Improvements of emergence and tuber yield of potato in a seasonal spring arid region using plastic film mulching only on the ridge[J]. Field Crops Research, 2018, 223: 57–65.
- [17] FAN Y Q, DING R S, KANG S Z, et al. Plastic mulch decreases available energy and evapotranspiration and improves yield and water use efficiency in an irrigated maize cropland[J]. Agricultural Water Management, 2016, 179: 122–131.
- [18] 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.

- [19] QIN S H, ZHANG J L, DAI H L, et al. Effect of ridge-furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 131: 87–94.
- [20] SHUKLA S, PANDEY S S, CHANDRA M, et al. Application of essential oils as a natural and alternate method for inhibiting and inducing the sprouting of potato tubers[J]. *Food Chemistry*, 2019, 284: 171–179.
- [21] RENAULT D, WALLENDER W W. Nutritional water productivity and diets[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 45: 275–296.
- [22] BROWN C R. Antioxidants in potato[J]. *American Journal of Potato Research*, 2005, 82(2): 163–172.
- [23] VAN DAM J, KOOMAN P L, STRUIK P C. Effects of temperature and photoperiod on early growth and final number of tubers in potato (*Solanum tuberosum* L.)[J]. *Potato Research*, 1996, 39(1): 51–62.
- [24] SHOCK C C, PEREIRA A B, ELDREDGE E P. Irrigation best management practices for potato[J]. *American Journal of Potato Research*, 2007, 84(1): 29–37.
- [25] ONDER S, CALISKAN M E, ONDER D, et al. Different irrigation methods and water stress effects on potato yield and yield components[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 73: 73–86.
- [26] ZHENG M Z, LEIB B, BUTLER D M, et al. Assessing heat management practices in high tunnels to improve organic production of bell peppers[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 246: 928–941.
- [27] 宋娜, 王凤新, 杨晨飞, 等. 水氮耦合对膜下滴灌马铃薯产量、品质及水分利用的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(13): 98–105.
- SONG Na, WANG Fengxin, YANG Chenfei, et al. Coupling effects of water and nitrogen on yield, quality and water use of potato with drip irrigation under plastic film mulch[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(13): 98–105. (in Chinese)
- [28] TARARA J M. Microclimate modification with plastic mulch[J]. *Hort Science*, 2000, 35(2): 169–180.
- [29] KADER M A, SENGE M, MOJID M A, et al. Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 168: 155–166.
- [30] ZHANG Y L, WANG F X, SHOCK C C, et al. Effects of plastic mulch on the radiative and thermal conditions and potato growth under drip irrigation in arid Northwest China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 172: 1–11.
- [31] BONACHELA S, GRANADOS M R, LÓPEZ J C, et al. How plastic mulches affect the thermal and radiative microclimate in an unheated low-cost greenhouse[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 152: 65–72.
- [32] LIKATAS A, CLARK J A, MONTEITH J L. Measurements of the heat balance under plastic mulches. Part I. Radiation balance and soil heat flux[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, 36(3): 227–239.
- [33] ANIKWE M A N, MBAH C N, EZEAKU P I, et al. Tillage and plastic mulch effects on soil properties and growth and yield of cocoyam (*Colocasia esculenta*) on an ultisol in Southeastern Nigeria[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93(2): 264–272.
- [34] RUIZ J M, HERNANDEZ J, CASTILLA N, et al. Potato performance in response to different mulches. 1. Nitrogen metabolism and yield[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1999, 47(7): 2660–2665.
- [35] YAGHI T, ARSLAN A, NAOUM F. Cucumber (*Cucumis sativus*, L.) water use efficiency (WUE) under plastic mulch and drip irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 128: 149–157.
- [36] HAM J M, KLUITENBERG G J, LAMONT W J. Optical properties of plastic mulches affect the field temperature regime[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1993, 118(2): 188–193.
- [37] FENG Y, GONG D Z, MEI X R, et al. Energy balance and partitioning in partial plastic mulched and non-mulched maize fields on the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 191: 193–206.
- [38] LI F M, GUO A H, WEI H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat[J]. *Field Crops Research*, 1999, 63: 79–86.
- [39] 李毅, 邵明安, 王文焰, 等. 不同灌水定额条件下的覆膜开孔蒸发实验研究[J]. *水科学进展*, 2004, 15(3): 357–363.
- LI Yi, SHAO Ming'an, WANG Wenyan, et al. Experimental research on evaporation from perforated plastic mulch with different irrigation quotas[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(3): 357–363. (in Chinese)
- [40] 马忠明, 杜少平, 薛亮. 不同覆膜方式对旱砂田土壤水热效应及西瓜生长的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(5): 1295–1302.
- MA Zhongming, DU Shaoping, XUE Liang, et al. Influences of different plastic film mulches on temperature and moisture of soil and growth of watermelon in gravel-mulched land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(5): 1295–1302. (in Chinese)
- [41] 胡晓棠, 李明思. 膜下滴灌对棉花根际土壤环境的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(3): 121–123.
- HU Xiaotang, LI Mingsi. Effect of trickle irrigation under sub-film on the soil conditions of rhizosphere in cotton[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(3): 121–123. (in Chinese)
- [42] YANG K J, WANG F X, SHOCK C C, et al. Potato performance as influenced by the proportion of wetted soil volume and nitrogen under drip irrigation with plastic mulch[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 260–270.
- [43] 赵爱琴, 魏秀菊, 朱明. 基于 Meta-analysis 的中国马铃薯地膜覆盖产量效应分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(24): 1–7.
- ZHAO Aiqin, WEI Xiuju, ZHU Ming. Meta analysis on impact of plastic film on potato yield in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(24): 1–7. (in Chinese)