

DOI: 10.11686/cyxb2020233

http://cyxb.magtech.com.cn

方彦杰, 张绪成, 于显枫, 等. 地膜覆盖和施肥对半干旱区苦荞土壤水分利用及产量的影响. 草业学报, 2020, 29(11): 46-56.

Fang Y J, Zhang X C, Yu X F, et al. Effects of soil plastic mulching and fertilizer application on the water utilization and yield of Tartary buckwheat crops in a semiarid rain-fed area. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(11): 46-56.

地膜覆盖和施肥对半干旱区苦荞 土壤水分利用及产量的影响

方彦杰^{1,2}, 张绪成^{1,2*}, 于显枫^{1,2}, 侯慧芝^{1,2}, 王红丽^{1,2}, 马一凡¹, 张国平¹, 雷康宁¹

(1. 甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省旱作区水资源高效利用重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:探究地膜覆盖和施肥对西北半干旱区苦荞土壤贮水量、阶段耗水量、植株生长、产量和水分利用效率的影响, 可为半干旱区苦荞抗旱增产、资源高效利用提供理论依据。于2015—2017年设置传统种植不施肥(TNF)、地膜覆盖不施肥(MNF)、地膜覆盖施肥(MF)3个处理, 测定了苦荞不同生育时期土壤含水量(0~300 cm土层)、干物质质量、叶面积指数、产量等指标, 计算土壤贮水量、阶段耗水量、收获指数、水分利用效率(WUE)和年降水利用效率(RUE)等指标。结果表明, 与TNF、MNF相比, MF能够增加苦荞苗期0~140 cm土层土壤贮水量18.9~42.4 mm、花前土壤耗水量, 使苦荞成熟期干物质质量平均增加96.3%、3.7%, 叶面积指数增加123.7%、7.6%, 成穗数增加9.3%、3.9%, 单株粒重增加139.2%、12.1%, 籽粒饱满率增加14.5%、4.4%, 籽粒位高显著降低34.0%、26.8%。由于MF改善了苦荞农田土壤水分状况, 调节了生育期耗水进程, 显著促进了苦荞生长, 其产量较TNF增加33.6%~130.4%、生物量增加62.8%~182.5%、水分利用效率提高34.5%~106.4%, 而且这一增产增效作用在欠水年更加显著。综上, 地膜覆盖和施肥显著提高了苦荞水分利用效率与产量, 是西北黄土高原半干旱区苦荞抗旱增产、资源高效的有效措施。

关键词:苦荞; 地膜覆盖; 施肥; 水分利用效率; 产量

Effects of soil plastic mulching and fertilizer application on the water utilization and yield of Tartary buckwheat crops in a semiarid rain-fed area

FANG Yan-jie^{1,2}, ZHANG Xu-cheng^{1,2*}, YU Xian-feng^{1,2}, HOU Hui-zhi^{1,2}, WANG Hong-li^{1,2}, MA Yi-fan¹, ZHANG Guo-ping¹, LEI Kang-ning¹

1. Institute of Dry-Land Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of High Water Utilization on Dryland of Gansu Province, Lanzhou 730070, China

Abstract: This research investigated the effects of fertilizer application and soil-plastic mulching on soil water storage, periodic evapotranspiration (ET), plant development, yield and water use efficiency (WUE) of Tartary buckwheat crops grown in a semiarid rain-fed area, in order to identify cultivation techniques that enhance crop drought resistance and efficient resource utilization. A field experiment comprising three treatments was conducted from 2015 to 2017 at Dingxi Experimental Station of Gansu Academy of Agricultural Sciences. The three treatments were: traditional planting without fertilization application (TNF), whole field soil-plastic mulching without fertilization application (MNF), and whole field soil-plastic mulching with fertilization appli-

收稿日期: 2020-05-21; 改回日期: 2020-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(31760367)和甘肃省农业科学院农业科技创新专项计划(2019GAAS10)资助。

作者简介: 方彦杰(1982-), 男, 甘肃天水人, 副研究员, 硕士。E-mail: fangyj82@126.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: gszhangxuch@163.com

cation (MF). The soil water content for the 0–300 cm soil depth, crop dry matter, leaf area index and yield of Tartary buckwheat were recorded. The soil water storage, periodic measurements of ET, harvest index, rain-water use efficiency (RUE) and water use efficiency (WUE) were calculated, to determine the effects of fertilizer application and soil plastic mulching and bunch seeding on water utilization and yield. It was found that MF increased soil water storage by 18.9–42.4 mm in the 0–140 cm soil layer during the seedling stage, and the ET in the pre-flowering period, as compared with TNF and MNF. Compared to TNF and MNF, respectively, MF increased the dry matter quality at maturity by an average of 96.3% and 3.7%, the leaf area index by 123.7% and 7.6%, the number of ears by 9.3% and 3.9%, the grain weight per plant by 139.2% and 12.1%, the grain plumpness by 14.5% and 4.4%, and reduced the ear height by 34.0% and 26.8%. Compared to TNF, MF significantly promoted the population-level statistics of Tartary buckwheat, with a yield increase of 33.6%–130.4%, a biomass increase of 62.8%–182.5%, an enhancement of WUE of 34.5%–106.4%, and these effects were more pronounced in dry seasons. Therefore, the cultivation practice comprising whole-field soil plastic mulching with fertilizer application improves the yield and WUE of Tartary buckwheat, can be recommended as a suitable planting mode for drought amelioration and yield increase of Tartary buckwheat in the semi-arid area of the northwest Loess Plateau.

Key words: tartary buckwheat; soil-plastic mulching; fertilization; water use efficiency; yield

水分和养分是旱地农业发展的两个关键限制因子,如何最大限度地利用天然降水,实现水肥高效耦合对提高旱地作物产量具有重要意义^[1]。研究表明,地膜覆盖和施肥对作物产量、水分利用效率有重要影响^[2–3],土壤养分是影响作物生长和产量形成的最重要因素之一^[4],合理施肥能够显著提高作物生产力^[5]。土壤水分状况是影响旱地作物生长的最关键因素,对作物生长发育和产量水平具有决定性影响^[6]。地膜覆盖能减少土壤水分蒸发而改善土壤水分状况,可提高土壤的水分供应能力,进而促进作物干物质质量形成,有利于产量和水分利用效率的提高^[7]。提高化肥利用率、促进自然降水高效利用是半干旱区旱作农业增产增效的关键^[8]。近年来,全膜覆盖种植技术在旱作农业中广泛应用,该技术可以有效减少裸间土壤水分蒸发,增加贮水量,降低水分亏缺程度,提高作物产量^[9–10]。同时其能够将 <5 mm 无效降水集中转化为有效降水,增加土壤贮水量,提高土壤水分的有效性^[11–12]。已有研究表明,结合氮磷钾肥合理配施,全膜覆盖种植可使苦荞(*Fagopyrum tataricum*)产量增加 7.26%~95.25%,水分利用效率提高 7.59%~87.08%^[13]。可见,地膜覆盖结合氮磷钾配施种植不仅能提高产量,增加经济效益,还可提高肥料利用率和水分利用效率,达到水肥协调的目的^[14–15]。苦荞主要分布于中国西北和西南地区^[16–17],种植面积约为 35 万 hm^2 ,产量约 50 万 t ^[18]。苦荞营养丰富,富含蛋白质、维生素、矿质元素和黄酮类物质等,食用价值高^[19]。在生产上,它具有生育期短、适应性强的优点,是干旱半干旱区重要的特色作物之一^[20]。西北旱地苦荞主要种植在黄土高原半干旱区,该区域降水稀少,年际间分布不均,60%~80%的降水发生在 7–9 月,是典型的雨养农业地区^[21–22]。该区域苦荞生产面临的主要问题就是干旱和施肥不科学,缺乏有效的水肥协同的种植技术。目前国内关于施肥和地膜覆盖种植相结合对旱地苦荞土壤水分利用及产量影响的研究尚不多见。为此,本试验研究了地膜覆盖和施肥对苦荞土壤贮水量、阶段耗水量、干物质积累、叶面积指数以及产量、水分利用效率的影响,探讨其对旱作苦荞产量形成和土壤水分利用的影响,为西北黄土高原旱作区苦荞抗旱增产技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验于 2015–2017 年在甘肃省农业科学院定西试验站(35°35' N, 104°36' E)进行。试验区海拔 1970 m,年平均气温 6.2 °C,年平均太阳辐射总量为 5898 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,年日照时数 2500 h, ≥ 10 °C 的有效积温为 2075.1 °C,无霜期 140 d,农作物一年一熟。试验区属典型旱作雨养农业区,多年平均降水量为 415 mm,主要分布在 6–9

月,占全年降水量的68%,降水相对变率为24%,400 mm降水保证率为48%。试验区土壤属于黄绵土,0~30 cm土层平均土壤容重为 $1.25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水量为21.8%,永久凋萎系数为7.2%,土壤有机质含量为 $11.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全N含量为 $1.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全P含量为 $0.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全K含量为 $17.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH为8.35。

1.2 试验设计

本试验采用随机区组设计,采用全膜覆土穴播种植方法,设2个施肥水平:不施肥和施肥[施纯N $40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 K_2O $20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中氮肥、磷肥、钾肥依次分别为尿素(46%),磷酸二铵(64%)和氯化钾(50%)],共设传统种植不施肥(traditional planting+no fertilization application, TNF)、地膜覆盖施肥(mulching+fertilization application, MF)、地膜覆盖不施肥(mulching+no fertilization application, MNF)3个处理,每个处理3次重复,小区面积 35 m^2 ($5 \text{ m} \times 7 \text{ m}$)。肥料按施肥处理划区撒施,全部基施,采用穴播机条播,播深3~4 cm,每穴5~7粒,行距30 cm,穴距12 cm,密度180万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 。试验供试苦荞品种为云荞2号。苦荞播种期分别为2015年5月6日、2016年5月29日和2017年5月26日,收获期分别为2015年8月31日、2016年9月5日和2017年9月12日。试验在全生育期除拔草外不进行其他管理。

1.3 试验区2015—2017年降水量和平均气温

根据甘肃省农业科学院定西试验站气象资料统计,苦荞生育期多年平均降水量为189.3 mm、多年平均气温为 $16.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 。试验区2015年苦荞全生育期降水量为193.4 mm,平均气温为 $16.3 \text{ }^\circ\text{C}$,属平水年。2016年苦荞全生育期降水量为149.3 mm,平均气温为 $19.1 \text{ }^\circ\text{C}$,属干旱欠水年。2017年苦荞全生育期降水量为242.9 mm,平均气温为 $17.8 \text{ }^\circ\text{C}$,属丰水年(图1)。2015年降水分布较均匀,气温与多年平均气温基本持平,2016和2017年降水分布不均,高温现象突出,两年均在苦荞花期发生持续季节性干旱,对苦荞的生长造成一定的影响。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 土壤水分 在苦荞播期、苗期、分枝期、盛花期、灌浆期和收获期用烘干法测定0~300 cm土层土壤含水量,每20 cm为一个层次,每小区两穴株间测定一个位点。土壤贮水量(soil water storage, SWS, mm)计算公式^[8]:

$$\text{SWS} = 10 \times h \times a \times \theta$$

式中: h 代表土壤深度(cm), a 代表土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), θ 代表体积含水量($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)。

1.4.2 阶段耗水量(evapotranspiration, ET)^[8]:

$$\text{ET}_i = \text{SWS}_i - \text{SWS}_{i+1} + P_i$$

式中: i 为苦荞某一生育时期; SWS_i 为苦荞某个生育时期初始时的土壤贮水量(mm); SWS_{i+1} 为该生育时期结束时的土壤贮水量(mm); P_i 为该生育阶段降水量(mm)。

1.4.3 水分利用效率(water use efficiency, WUE, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)^[9]:

$$\text{WUE} = Y_d / \text{ET}, \text{ 其中 } \text{ET} = \text{SWS}_{\text{BF}} - \text{SWS}_{\text{HA}} + P$$

式中: Y_d 为苦荞单位面积产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); SWS_{BF} 为苦荞播种前土壤贮水量(mm); SWS_{HA} 为苦荞收获后土壤贮水量(mm); P 为苦荞全生育期降水量(mm)。

1.4.4 年降水利用效率(rainfall use efficiency, RUE, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)^[15]:

$$\text{RUE} = Y_d / R$$

式中: R 为苦荞全年降水量(mm)。

1.4.5 干物质量 在苦荞苗期、分枝期、盛花期、灌浆期和收获期,每小区选取长势均匀的10株,用烘干法测定地上部分干物质量^[13]。

1.4.6 叶面积指数 在苦荞分枝期、盛花期、灌浆期和收获期,在晴天10:00用CI-110植物冠层数字图像分析仪(美国)测定叶面积指数(leaf area index, LAI),每小区测定3次,计算其平均值为小区LAI。

1.4.7 收获指数(harvest index, HI)^[9]:

$$\text{HI} = Y_d / \text{地上部分生物量} \times 100\%$$

1.4.8 产量及其农艺性状 在苦荞成熟期测定成穗数、株高、籽粒位高和单株粒重等指标,统计籽粒饱满率,苦荞人工收割后,按小区实收计产^[9]。

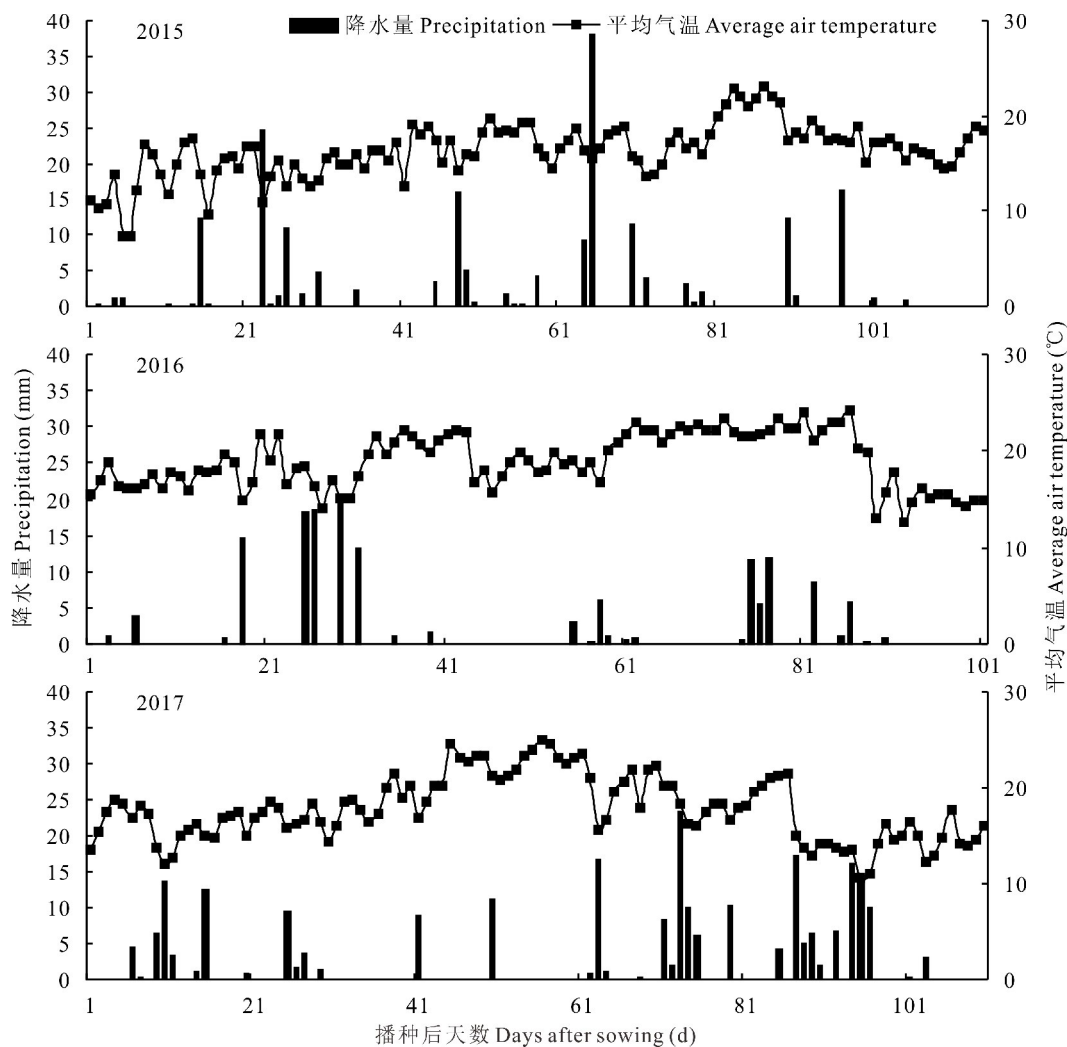


图 1 2015—2017 年试验区降水和气温变化

Fig. 1 Changes of precipitation and average air temperature in experimental area from 2015 to 2017

1.5 数据统计与分析

用 Microsoft Excel 2010 软件作图,用 DPS 数据处理软件进行统计分析,用 LSD 法检验处理间的差异显著性($P < 0.05$, $P < 0.01$)。

2 结果与分析

2.1 地膜覆盖和施肥对苦荞干物质量的影响

由图 2 可知,3 年间不同生育期 MF 的干物质量均高于 MNF 和 TNF,2015 年 MF 和 MNF 的干物质量分别较 TNF 增加 48.0%~93.1%和 39.3%~87.8%,收获期增加 73.1%和 65.2%,且差异显著($P < 0.05$)。2016 年 MF 和 MNF 的干物质量较 TNF 分别增加 88.9%~372.2%和 70.5%~312.9%,收获期增加 142.6%和 139.1%,且差异显著($P < 0.05$)。2017 年 MF 和 MNF 的干物质量较 TNF 分别增加 55.7%~184.6%和 42.8%~158.6%,收获期增加 83.2%和 68.4%,MF 较 MNF 增加 8.8%~62.5%,在盛花期至收获期处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.2 地膜覆盖和施肥对苦荞叶面积指数的影响

3 年不同生育期叶面积指数 MF 均高于 TNF 和 MNF(图 3),2015 年 MF 较 TNF 和 MNF 分别高 14.8%~67.4%和 10.0%~12.4%,分枝期、灌浆期、收获期处理间差异显著($P < 0.05$),盛花期 MF 和 MNF 与 TNF 间差异显著($P < 0.05$);2016 年 MF 较 TNF 和 MNF 分别高 85.6%~212.5%、4.8%~10.3%,盛花期处理间差异

显著($P < 0.05$),分枝期、灌浆期、收获期 MF 和 MNF 与 TNF 差异均显著($P < 0.05$);2017 年 MF 较 TNF 和 MNF 分别增加 144.8%~218.1%、5.7%~45.0%,分枝期和盛花期处理间差异显著($P < 0.05$),灌浆期、收获期 MF 和 MNF 与 TNF 差异均显著($P < 0.05$)。

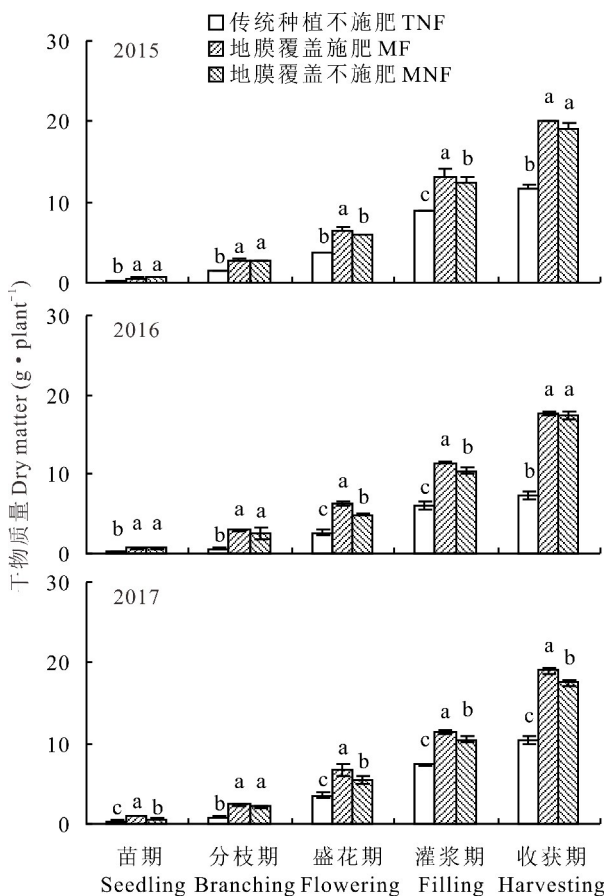


图 2 苦荞干物质质量

Fig. 2 Dry matter of tartary buckwheat

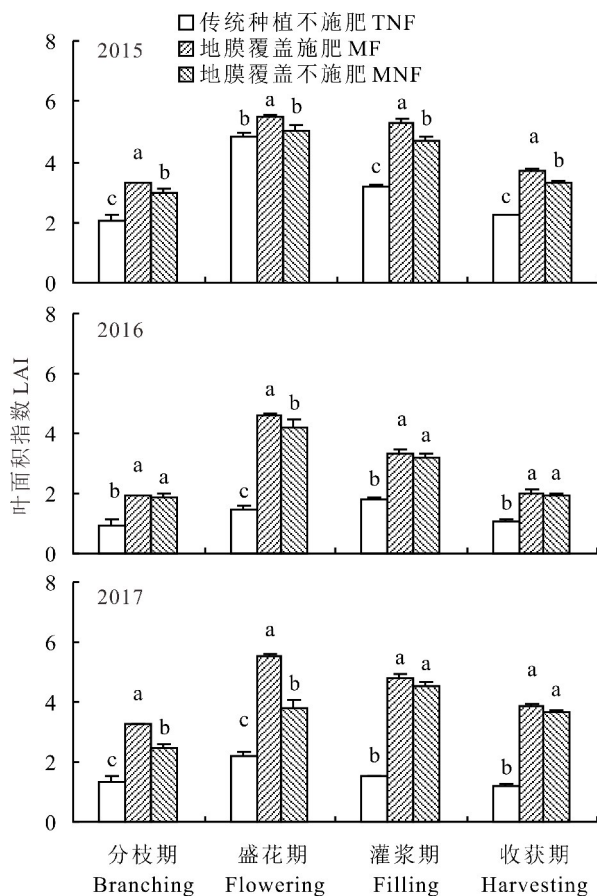


图 3 苦荞叶面积指数

Fig. 3 LAI of tartary buckwheat

不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。Different letters mean significant difference among treatments at 0.05 level, the same below.

2.3 地膜覆盖和施肥对苦荞产量构成及农艺性状的影响

2015 年 MF 的成穗数较 TNF 和 MNF 减少 5.5%、1.7%,而 2016 与 2017 年其分别较 TNF 和 MNF 增加 16.5%、6.8%和 16.9%、6.7%(表 1),且处理间差异显著($P < 0.05$);株高 3 年均表现为 MF>MNF>TNF, TNF 显著低于 MF 和 MNF($P < 0.05$);籽粒位高 3 年间 MF 均最低,2015 和 2017 年表现为 TNF>MNF>MF, 2016 年则为 MNF>TNF>MF,且处理间差异显著($P < 0.05$);单株粒重 3 年均表现为 MF>MNF>TNF, MF 较 TNF 和 MNF 分别增加 116.1%和 17.1%、141.4%和 1.6%、160.2%和 17.5%,2015 和 2017 年处理间差异显著($P < 0.05$),2016 年 MF 和 MNF 与 TNF 差异显著($P < 0.05$);籽粒饱满率与单株粒重表现一致,3 年 MF 较 TNF 和 MNF 分别增加 14.2%和 7.6%、14.9%和 0.7%、14.5%和 4.8%,2015 年处理间差异显著($P < 0.05$),2016 和 2017 年 MF 和 MNF 与 TNF 差异显著($P < 0.05$)。

2.4 地膜覆盖和施肥对苦荞产量、生物量及收获指数的影响

由图 4 可知,产量在 2015 年 MF 较 TNF 和 MNF 分别增加 33.6%和 3.3%,2016 年较 TNF 和 MNF 分别增加 130.4%和 1.1%,MF 和 MNF 与 TNF 差异显著($P < 0.05$),2017 年分别增加 95.0%和 22.7%,MNF 较 TNF 增加 59.0%,处理间差异显著($P < 0.05$);生物量在 2015 年 MF 较 TNF 和 MNF 分别增加 62.8%和 2.8%,且差异显著($P < 0.05$),2016 和 2017 年分别增加 182.5%和 8.3%、113.2%和 16.1%,处理间差异显著

($P < 0.05$); 收获指数与产量和生物量表现不一致, 2015 年 MF 较 TNF 和 MNF 分别降低 7.5% 和 0.3%, MF 和 MNF 与 TNF 差异显著 ($P < 0.05$), 2016 年 MF 分别较 TNF 和 MNF 降低 18.9% 和 6.7%, 2017 年较 TNF 降低 9.5%, 较 MNF 增加 5.6%, 处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

表 1 苦荞产量构成及农艺性状

Table 1 Yield-compositions and agronomic characters of tartary buckwheat

年份	处理	成穗数	株高	籽粒位高	单株粒重	籽粒饱满率
Year	Treatments	Spike number (10000 plant · hm ⁻²)	Plant height (cm)	Ear high (cm)	Grain weight per plant (g)	Percentage of full grain (%)
2015	传统种植不施肥 TNF	185.4a	125.6b	60.0a	3.3c	78.1c
	地膜覆盖施肥 MF	175.2a	157.4a	30.6c	7.1a	89.2a
	地膜覆盖不施肥 MNF	178.3a	152.6a	45.4b	6.1b	82.9b
2016	传统种植不施肥 TNF	161.6c	73.6b	31.8b	2.2b	49.9b
	地膜覆盖施肥 MF	188.2a	127.4a	29.4c	5.3a	57.3a
	地膜覆盖不施肥 MNF	176.3b	123.6a	34.7a	5.2a	56.9a
2017	传统种植不施肥 TNF	173.8c	94.2b	45.0a	2.5c	70.4b
	地膜覆盖施肥 MF	203.3a	125.9a	24.5c	6.4a	80.6a
	地膜覆盖不施肥 MNF	190.4b	122.0a	36.4b	5.5b	76.9a

注: 不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters mean significant difference among treatments at 0.05 level.

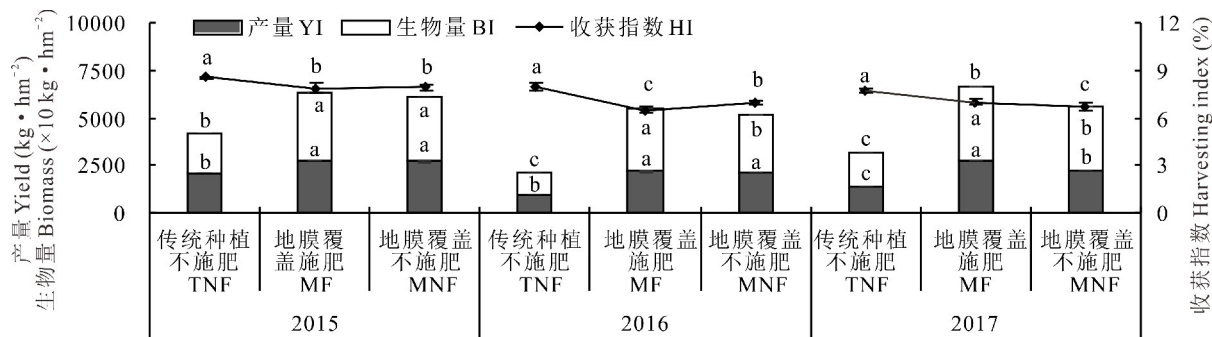


图 4 苦荞籽粒产量、生物量和收获指数

Fig. 4 Grain yield (YI), biomass (BI) and harvest index (HI) of tartary buckwheat

2.5 地膜覆盖和施肥对苦荞生育期土壤水分垂直动态的影响

2015 年播前 0~60 cm 土层土壤贮水量 MF 和 MNF 较 TNF 分别多 11.8 和 11.3 mm, 60~200 cm 较 TNF 分别多 29.3 和 24.5 mm, 苗期 0~60 cm 土层土壤贮水量 MF 较 MNF 和 TNF 分别多 12.0 和 23.1 mm, 0~140 cm 分别多 21.5 和 42.4 mm; 分枝期 0~80 cm 土层土壤贮水量 MF 较 MNF 和 TNF 减少 8.7 和 19.7 mm, 受雨季降水及生育期耗水的影响, 灌浆期和收获期土壤贮水量处理间无明显差异(图 5)。2016 年播前 0~60 cm 土层土壤贮水量 MF 较 MNF 和 TNF 分别多 13.4 和 23.2 mm, 苗期 0~60 cm 土层土壤贮水量 MF 较 MNF 和 TNF 分别多 9.2 和 10.8 mm, 0~140 cm 分别多 16.0 和 32.9 mm, 分枝期后受高温干旱的影响, 处理间差异不明显。2017 年苗期 0~60 cm 土层土壤贮水量 MF 较 MNF 和 TNF 分别多 6.6 和 10.3 mm, 0~140 cm 土层 MF 较 TNF 高 18.9 mm, 分枝期 0~140 cm 土层 MF 和 TNF 分别较 MNF 减少 45.6 和 44.3 mm, 盛花期和灌浆期 0~200 cm 土层 MF 分别较 MNF 和 TNF 减少 57.3 和 44.4 mm, 32.9 和 22.9 mm, 由于降水量显著增加和地膜覆盖保墒抑蒸作用, 收获期 0~60 cm 土层土壤贮水量 MF 和 MNF 明显高于 TNF。

2.6 地膜覆盖和施肥对苦荞花前花后耗水量的影响

地膜覆盖和施肥对苦荞花前和花后 0~300 cm 土层土壤耗水量有显著影响,且与不同降水年型有关(图 6)。2015 年花前耗水量 MF 较 TNF 和 MNF 增加 28.4 和 32.1 mm,而花后减少 31.2 和 17.6 mm。2016 年花前耗水量 MF 和 MNF 较 TNF 分别增加 28.3 和 42.7 mm,且差异显著($P < 0.05$),花后耗水量处理间均无显著性差异($P > 0.05$)。2017 年 MF 的花前耗水量较 TNF 和 MNF 分别增加 16.6 和 21.2 mm,且差异显著($P < 0.05$),花后耗水量 MNF 较 TNF 和 MF 增加 45.2 和 71.2 mm,差异显著($P < 0.05$)。

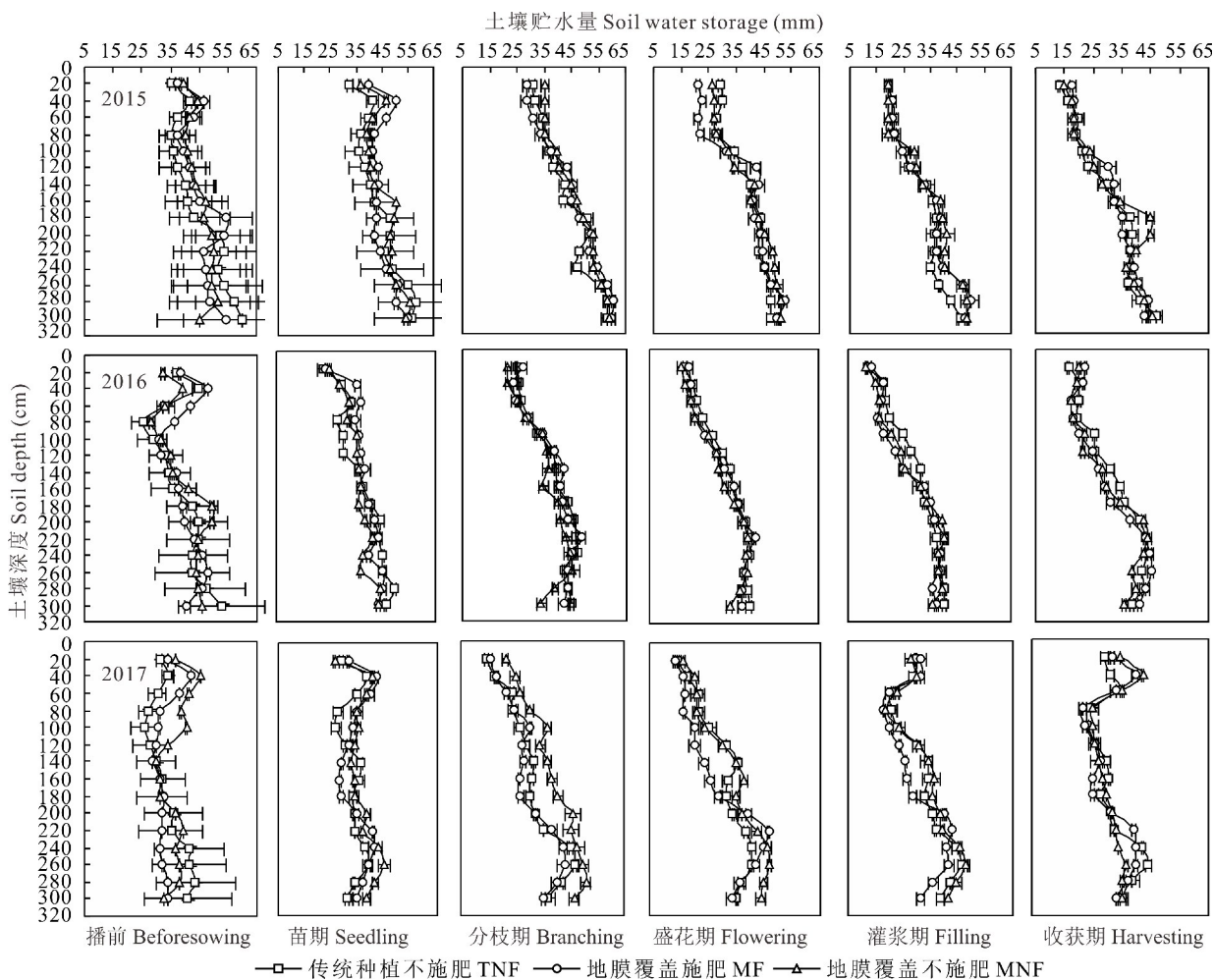


图 5 苦荞不同生育期土壤剖面贮水量

Fig. 5 Soil water storage in different layers at different growth stages of tartary buckwheat

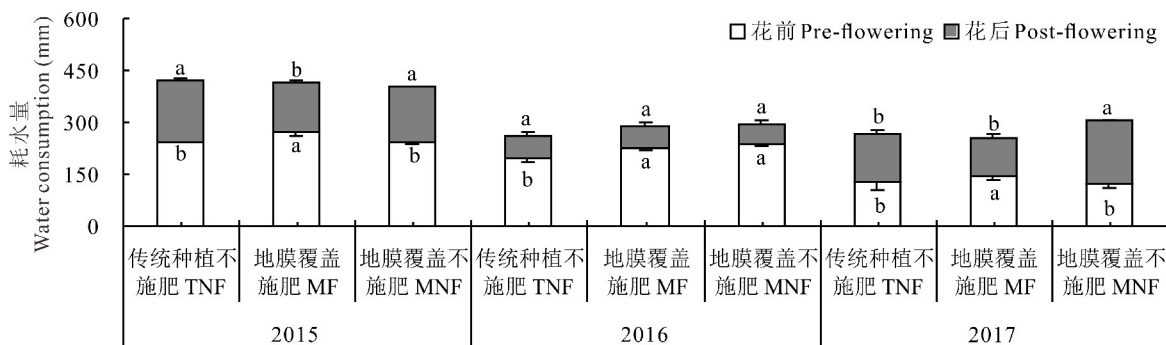


图 6 苦荞开花前和开花后耗水量

Fig. 6 Water consumption of tartary buckwheat in the pre-flowering and post-flowering

2.7 地膜覆盖和施肥对苦荞生育期耗水量和水分利用效率的影响

地膜覆盖和施肥对旱地苦荞的耗水量、水分利用效率(WUE)和年降水利用效率(RUE)的影响不同(图 7)。2015 年耗水量处理间无显著性差异($P>0.05$),水分利用效率和年降水利用效率均表现为 $MF>MNF>TNF$, MF 和 MNF 较 TNF 分别显著增加 34.5%和 34.9%、33.6%和 29.4%($P<0.05$); 2016 年 MF 和 MNF 的耗水量、WUE 和 RUE 较 TNF 分别增加 11.6%和 14.4%、106.4%和 130.4%、99.1%和 127.8%,表现为 MF 和 MNF 与 TNF 差异均显著($P<0.05$); 2017 年耗水量 MNF 较 TNF 和 MF 分别增加 15.3%和 19.6%,TNF 和 MF 与 MNF 差异均显著($P<0.05$),MF 的 WUE 和 RUE 较 TNF 和 MNF 分别增加 102.2%和 37.9%、95.0%和 59.0%,处理间差异显著($P<0.05$)。

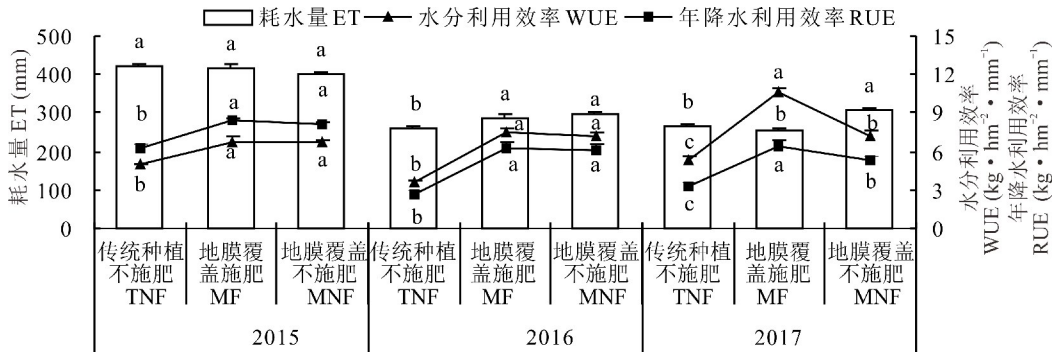


图 7 苦荞生育期耗水量、水分利用效率及年降水利用效率

Fig. 7 Evapotranspiration, water use efficiency and rainfall use efficiency of tartary buckwheat

3 讨论

干旱和降水稀少是西北黄土高原半干旱区农业生产最主要的限制因素,地膜覆盖较露地种植能够降低土壤水分的耗散,增加耕层土壤贮水量^[9-10]。大量研究表明,半干旱区旱地作物地膜覆盖种植后,不仅能够增加土壤温度^[23],增加作物生长前期土壤贮水量,减轻土壤干旱对作物的危害,还能够促进土壤养分的吸收,达到水肥耦合的效果,有利于作物生长发育^[8]。本研究结果表明,苦荞播前地膜覆盖后降低土壤无效蒸发,集水保墒效果明显,2015 年播前 0~200 cm 土层土壤贮水量 MF 较 MNF 增加 35.8 mm,苗期 0~140 cm 土层土壤贮水量增加 42.4 mm,2016 和 2017 年分别增加 32.9 和 18.9 mm,可知 MF 显著提高苦荞播前和苗期土壤贮水量,表明 MF 通过地膜覆盖增加了土壤有效水分,能够为苦荞提供较好的土壤生长环境,有利于苦荞发芽和生长^[10]。2015 年分枝期和盛花期 0~80 cm 土层土壤贮水量 MF 低于 TNF 和 MNF,2016 年分枝期 MF 较 MNF 略有减少,但较 MNF 增加,认为形成的主要原因是不同降水年型、不同生长阶段土壤耗水量差异的影响,表明地膜覆盖和施肥加快了土壤水分的消耗^[24],导致土壤贮水量的下降,同时,在高温干旱年份促进深层土壤中水分向根层土壤的转移^[25],本研究结果中 MF 能有效增加 0~20 cm 土层土壤贮水量与其相一致。本研究结果还发现,苦荞耗水量不仅与施肥、种植模式、降水量相关,还与当年降水分配有关^[14,22,25]。由于 MF 处理下的植物生长较旺盛,土壤水分耗水较多,2017 年盛花期和灌浆期 0~200 cm 土层土壤贮水量 MF 较 MNF 和 TNF 下降显著。本研究结果表明,无论何种降水年型,MF 较 TNF 花前 0~300 cm 土层土壤耗水量增加,而总耗水量在平水年和丰水年并没有显著增加,表明地膜覆盖和施肥有效改善了苦荞生长的土壤水分和养分环境,调节了生育期的耗水进程,增加了花前耗水量,降低土壤干旱的胁迫,增强苦荞抗旱能力。

地膜覆盖能够合理调控农田生态系统的小气候,有利于作物生长发育^[26],施肥对作物生长发育过程中干物质的积累影响显著^[27]。合理的栽培措施可提高作物成穗数、穗粒数、籽粒重等产量构成指标^[25,28-29],由于冬小麦(*Triticum aestivum*)地膜覆盖后对土壤水分和氮素的吸收利用能力增强,使其 hm^2 穗数增加,生物产量提高 25.45%^[28]。本研究中,降水年型对苦荞成穗数、单株粒重和籽粒饱满率有一定的影响,3 年地膜覆盖结合施肥处

理下收获期苦荞的干物质量、叶面积指数均高于其他处理,表明地膜覆盖结合施肥能够充分利用地膜覆盖和施肥的水肥耦合效应,增加苦荞干物质量积累,提高叶面积指数,促进苦荞生长,有利于形成高产。

施肥对地膜覆盖作物产量的形成和水分利用有重要影响^[14,25]。研究表明,地膜覆盖后合理施肥可改善作物根层土壤水热条件,增加生育前期土壤贮水量,生长加快,同时其使生育前期耗水增加,后期遇到干旱或降水补充不足,容易造成土壤干旱缺水,进而对产量和水分利用效率有一定的影响^[30]。旱地小麦地膜覆盖结果表明,虽然在花后小麦受到干旱和高温胁迫,但其产量和水分利用效率显著高于不覆膜种植^[10]。本研究结果表明,无论何种降水年型,地膜覆盖施肥条件下苦荞的产量最高,与 TNF 差异显著,尤其在欠水年的差异更加明显。本研究中在平水年和欠水年 MF 的产量和生物量与 MNF 无显著差异,认为这主要与降水量及其分布相关,较低的降水量没有有效促进化肥的作用^[28,31]。大量研究表明,覆膜和施肥能增加作物生育期耗水量,提高作物产量和水分利用效率^[11-15],是解决干旱半干旱地区土壤水分紧缺问题的重要措施。但本研究发现,与 TNF 相比,MF 条件下 0~300 cm 土层土壤耗水量仅在欠水年差异显著,在平水年和丰水年无显著性差异,表明苦荞覆膜种植并没有过多消耗土壤水分,而是高效利用了土壤接纳的有效降水。水分利用效率和年降水利用效率结果表明,MF 和 MNF 较 TNF 可以提高 WUE 和 RUE。平水年和欠水年 MF 与 MNF 的 WUE 和 RUE 差异不明显,但在丰水年差异显著,表明在本试验条件下,合理施肥和地膜覆盖种植可以有效蓄水保墒,且使生育期耗水量并没有显著增加,使苦荞产量和生物量增加且降水利用效率显著提高^[32]。

4 结论

在西北黄土高原半干旱区,在施肥量为纯 N 40 kg · hm⁻²、P₂O₅ 30 kg · hm⁻²、K₂O 20 kg · hm⁻² 条件下,地膜覆盖种植能够提高苦荞苗期 0~140 cm 土层土壤贮水量,调节生育进程中耗水分配,增加花前 0~300 cm 土层土壤耗水量,显著提高苦荞干物质量、叶面积指数、成穗数、单株粒重和籽粒饱满率,有效促进植株群体生长,显著增加产量和生物量,提高土壤水分利用效率,且在欠水年份更加突出,实现了半干旱区旱地苦荞水肥协调、抗旱增产和水肥资源高效利用的目的。

参考文献 References:

- [1] Xin N Q, Hou X Y, Zhang Y Q. Important progress on research development and counter measures of dry land agriculture in North China. *Transaction of the Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(4): 58-60.
信乃诠, 侯向阳, 张燕卿. 我国北方旱地农业研究开发进展及对策. *中国生态农业学报*, 2001, 9(4): 58-60.
- [2] Lamprey S, Li L L, Xie J H. Nitrogen time of application impact on productivity, water use efficiency and agronomic efficiency of maize in a semi-arid environment. *Journal of Agricultural Science*, 2018, 10: 71-79.
- [3] Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924.
- [4] Fan B H, Ma L L, Ren R D, *et al.* Effects of irrigation frequency of organic nutrient solution and irrigation amount on yield, quality, fertilizer and water use efficiency of melon in facility. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1261-1268.
范兵华, 马乐乐, 任瑞丹, 等. 有机营养液灌溉频次和灌水量对设施甜瓜产量、品质及肥水利用效率的影响. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1261-1268.
- [5] Cai S H, Xu Y, Wang J S, *et al.* Relationship between spatio-temporal variability of soil moisture and nutrients and crop yield. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12): 26-31.
蔡守华, 徐英, 王俊生, 等. 土壤水分和养分时空变异性与作物产量的关系. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 26-31.
- [6] Zhong L P, Shao M A, Li Y S. Changes of ecosystem productivity responding to driving forces in semiarid region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(4): 510-515.
钟良平, 邵明安, 李玉山. 农田生态系统生产力演变及驱动力. *中国农业科学*, 2004, 37(4): 510-515.
- [7] Li L L, Huang G B, Zhang R Z, *et al.* Effects of conservation tillage on soil water regimes in rainfed areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2326-2332.
李玲玲, 黄高宝, 张仁陟, 等. 不同保护性耕作措施对旱作农田土壤水分的影响. *生态学报*, 2005, 25(9): 2326-2332.
- [8] Wang H, Wang S L, Xu Z G, *et al.* Effect of tillage and fertilization on water use efficiency of maize in dryland conditions. *Transaction of the Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(6): 856-864.

- 王浩, 王淑兰, 徐宗贵, 等. 耕作与施肥对旱地玉米田土壤耗水量和水分利用效率的影响. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 856—864.
- [9] Hou H Z, Lü J F, Guo T W, *et al.* Effects of whole field soil-plastic mulching on spring wheat water consumption, yield, and soil water balance in semi-arid region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(22): 4392—4404.
侯慧芝, 吕军峰, 郭天文, 等. 旱地全膜覆土穴播对春小麦耗水、产量和土壤水分平衡的影响. 中国农业科学, 2014, 47(22): 4392—4404.
- [10] Wang H L, Song S Y, Zhang X C, *et al.* Effects of using plastic film as mulch combined with bunch planting on soil temperature, moisture and yield of spring wheat in a semi-arid area in drylands of Gansu, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18): 5580—5588.
王红丽, 宋尚有, 张绪成, 等. 半干旱区旱地春小麦全膜覆土穴播对土壤水热效应及产量的影响. 生态学报, 2013, 33(18): 5580—5588.
- [11] Mo F, Zhou H, Wang J Y. Development and application of micro-field rain-harvesting techniques. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(8): 1—17.
莫非, 周宏, 王建永. 田间微集雨技术研究及应用. 农业工程学报, 2013, 29(8): 1—17.
- [12] Li F M, Wang J, Zhao S L. The rainwater harvesting technology approach for dryland agriculture in semi-arid Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2): 260—264.
李凤民, 王静, 赵松岭. 半干旱黄土高原集水高效旱地农业的发展. 生态学报, 1999, 19(2): 260—264.
- [13] Fang Y J, Zhang X C, Yu X F, *et al.* Effects of whole soil-plastic mulching with hole-sowing on soil temperature, moisture and yield of buckwheat in aridlands. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(7): 1073—1082.
方彦杰, 张绪成, 于显枫, 等. 旱地全膜覆土穴播荞麦田土壤水热及产量效应研究. 作物学报, 2019, 45(7): 1073—1082.
- [14] Yu X F, Zhang X C, Wang H L, *et al.* Effects of fertilizer application on water consumption characteristics and yield of potato cultured under ridge-furrow and whole filed plastic mulching in rain-fed area. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(3): 883—890.
于显枫, 张绪成, 王红丽, 等. 施肥对旱地全膜覆盖垄沟种植马铃薯耗水特征及产量的影响. 应用生态学报, 2016, 27(3): 883—890.
- [15] Fan T L, Wang S Y, Tang X M, *et al.* Grain yield and water use in a long-term fertilization trial in Northwest China. *Agricultural Water Management*, 2005, 76: 36—52.
- [16] Ren C Z, Zhao G. Chinese buckwheat. Beijing: China Agriculture Press, 2015.
任长忠, 赵钢. 中国荞麦. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [17] Chen Q F. Science of buckwheat. Beijing: China Science Press, 2012.
陈庆富. 荞麦科学. 北京: 中国科学出版社, 2012.
- [18] Chen Q F. The status of buckwheat production and recent progresses of breeding on new type of cultivated buckwheat. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, 36(3): 1—7.
陈庆富. 荞麦生产状况及新类型栽培荞麦育种研究的最新进展. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(3): 1—7.
- [19] Zhang X, Cui X D, Li Y Y, *et al.* Purification and biochemical characterization of a novel allergenic protein from tatar buckwheat seeds. *Planta Medica*, 2008, 74(15): 1837—1841.
- [20] Feng B L, Yao A H, Gao J F, *et al.* Study on regional distribution and development of buckwheat in China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(3): 375—377.
冯佰利, 姚爱华, 高金峰, 等. 中国荞麦优势区域布局与发展研究. 中国农学通报, 2005, 21(3): 375—377.
- [21] Zhou L M, Li F M, Jin S L, *et al.* How two ridges and the furrow mulched with plastic film affects soil water temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China. *Field Crop Research*, 2009, 113: 41—47.
- [22] Li F R, Zhao S L, Geballe G T. Water use patterns and agronomic performance for some cropping systems with and without fallow crops in a semi-arid environment of Northwest China. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2000, 79: 129—142.
- [23] Tian X H, Nie G, Li S X. Effect of water and nutrients supplying in different soil layers on growth and nutrition absorption of corn seedling. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(4): 263—267.
田霄鸿, 聂刚, 李生秀. 不同土壤层次供应水分和养分对玉米幼苗生长和吸收养分的影响. 土壤通报, 2002, 33(4): 263—267.
- [24] Song T, Wang H L, Chen N L, *et al.* Regulation of whole field soil-plastic mulching with bunch planting and whole field sand mulching with flat planting on soil moisture and yield of spring wheat in semiarid dryland areas. *Transaction of the Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(10): 1174—1181.
宋婷, 王红丽, 陈年来, 等. 旱地全膜覆土穴播和全沙覆盖平作对小麦田土壤水分和产量的调节机理. 中国生态农业学报, 2014, 22(10): 1174—1181.

- [25] Xie Y H, Li T L, Hong J P, *et al.* Effects of nitrogen application and ridge film furrow planting on water use of winter wheat in dryland in Southern Shanxi. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(8): 2038–2044.
谢英荷, 李廷亮, 洪坚平, 等. 施氮和垄膜沟播种植对晋南旱地冬小麦水分利用的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2038–2044.
- [26] Fang Y J, Huang G B, Li L L, *et al.* Yield and growth dynamics of rainfed maize in the system of completely mulched alternating narrow and wide ridges with furrow planting. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(4): 128–134.
方彦杰, 黄高宝, 李玲玲, 等. 旱地全膜双垄沟播玉米生长发育动态及产量形成规律研究. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(4): 128–134.
- [27] Dong E W, Wang J S, Han P Y, *et al.* Effect of fertilization on growth, dry matter accumulation, nutrient uptake and distribution in sorghum. *Journal of Shanxi Agricultural Science*, 2012, 40(6): 645–650.
董二伟, 王劲松, 韩鹏远, 等. 施肥对高粱生长、干物质积累与养分吸收分配的影响. *山西农业科学*, 2012, 40(6): 645–650.
- [28] Zhao X D, Li T L, Xie Y H, *et al.* Effect of plastic film mulching on soil water and nitrogen balance in dryland wheat fields. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1–10.
赵晓东, 李廷亮, 谢英荷, 等. 覆膜对旱地麦田土壤水分及氮素平衡的影响. *生态学报*, 2018, 38(5): 1–10.
- [29] Rehman S, Khalil S K, Rehman A, *et al.* Micro-watershed enhances rain water use efficiency, phenology and productivity of wheat under rainfed condition. *Soil Tillage Research*, 2009, 104(1): 82–87.
- [30] Zhang X C, Wang H L, Yu X F, *et al.* The study on the effect of potato and beans intercropping with whole field plastics mulching and ridge-furrow planting on soil thermal-moisture status and crop yield on semi-arid area. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(3): 468–481.
张绪成, 王红丽, 于显枫, 等. 半干旱区全膜覆盖垄沟间作种植马铃薯和豆科作物的水热及产量效应. *中国农业科学*, 2016, 49(3): 468–481.
- [31] Yang C G, Chai S X, Chang L, *et al.* Effects of plastic mulching on water consumption characteristics and grain yield of winter wheat in arid region of Northwest China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(4): 661–671.
杨长刚, 柴守玺, 常磊, 等. 不同覆膜方式对旱作冬小麦耗水特性及籽粒产量的影响. *中国农业科学*, 2015, 48(4): 661–671.
- [32] Lenka S, Singh A K, Lenka N K. Water and nitrogen interaction on soil profile water extraction and ET in maize wheat cropping system. *Agriculture Water Manage*, 2009, 96: 196–207.