

DOI: 10.11766/trxb201701100518

沟垄二元覆盖对渭北旱塬区土壤肥力及玉米产量的影响*

李荣¹ 侯贤清¹ 贾志宽^{2, 3†}

(1 宁夏大学农学院, 银川 750021)

(2 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

(3 农业部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要 探讨沟垄二元覆盖对旱地土壤肥力及作物生产力的影响, 对完善半湿润区作物微集水栽培技术具有重要的理论和实践意义。2007—2011年在渭北旱塬进行5年定位试验, 设置垄上覆地膜, 沟内分别覆盖普通地膜、生物降解膜、玉米秸秆、液体地膜和沟不覆盖等不同沟垄覆盖模式, 以传统平作为对照。结果表明, 2011年春玉米收获后各处理土壤有机质及速效养分含量随土层的加深而降低, 与2007年试验处理前相比, 沟垄二元覆盖各处理土壤养分含量明显增加, 而垄覆地膜+沟不覆盖和传统平作处理有所下降。垄覆地膜沟覆秸秆处理0~20 cm层土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量均显著高于对照, 垄覆地膜沟覆地膜和垄覆地膜沟覆生物降解膜处理有机质和碱解氮含量较对照有所增加, 而其有效磷和速效钾含量显著增加。20~60 cm层土壤有机质和速效养分含量各沟垄二元覆盖处理均略高于对照。各沟垄覆盖处理表层(0~20 cm)土壤脲酶、磷酸酶和蔗糖酶活性均较对照增加, 且以垄覆地膜沟覆秸秆处理土壤酶活性最高, 垄覆地膜沟覆生物降解膜和垄覆地膜沟覆地膜处理次之。垄覆地膜沟覆生物降解膜、垄覆地膜沟覆地膜和垄覆地膜沟覆秸秆处理较对照显著增产41.1%、42.1%、39.3%, 水分利用效率显著提高38.0%、39.6%、37.0%。在渭北旱塬区进行沟垄二元覆盖对提高土壤肥力、酶活性及春玉米产量和水分利用效率有显著提高作用, 以垄覆地膜沟覆秸秆处理最佳, 垄覆地膜沟覆地膜和垄覆地膜沟覆生物降解膜次之。可见, 垄覆地膜沟覆地膜、生物降解膜或秸秆的沟垄全覆盖种植在渭北旱塬雨养农业区春玉米生产栽培具有一定的可行性和应用价值。

关键词 沟垄二元覆盖; 土壤养分; 土壤酶活性; 作物生产力; 水分利用效率

中图分类号 S158.3, S513 **文献标识码** A

黄土高原旱作区土壤贫瘠、抗蚀抗旱能力差, 土壤水分不足严重限制作物对肥料的吸收和利用, 作物水肥利用率低是该区农业生产发展中面临的重要问题^[1]。适宜的土壤水分, 不仅有利于土壤的形成和物质的矿化、分解、转化迁移等过程, 而且有利于肥料中营养物质溶解和迁移, 从而促进植物对肥料的吸收利用, 改善作物的营养状况^[2-3]。田间微集雨种植能有效利用垄膜进行集雨保墒, 改变降雨的时空分布, 使降雨和肥料集中于种植沟中, 利于作物对养分的吸收利用, 从而提高作物的水肥

利用效率^[4-5]。王珂等^[6]研究表明, 集雨种植模式可显著提高作物生育前期土壤水分含量, 水分利用效率和肥料农学效率分别提高3.8%、55.0%。可见, 集雨种植可改善土壤水分状况, 进而促进土壤养分有效性的发挥和利用。

垄覆膜集雨种植技术能改善土壤的水肥条件和酶及微生物活性, 加快土壤有机质的矿化, 使土壤养分有效性提高, 这必会影响到作物对养分的吸收利用^[7]。秦舒浩等^[8]研究发现, 沟垄覆膜种植能促进土壤有机质分解, 显著提高作物根区土壤速

* 国家自然科学基金项目(31301280)和国家科技支撑计划项目(2006BAD29B03)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31301280) and the National Science & Technology Program (No. 2006BAD29B03)

† 通信作者 Corresponding author, E-mail: zhikuan@tom.com

作者简介: 李荣(1984—), 女, 甘肃甘谷人, 博士, 副教授, 主要从事节水农业方面研究。E-mail: lirong_mail@126.com

收稿日期: 2017-01-10; 收到修改稿日期: 2017-04-22; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-05-05

效养分的含量。但慈恩等^[9]研究表明,稻田免耕垄作有利于土壤有机碳的积累,显著高于常规平作处理。王彩绒等^[10]研究报道,覆膜集雨种植技术协调了土壤水分和养分的关系,利于植株的协调生长,促进了地上部的养分携出量,最终获得高产。而曹莉等^[11]研究认为,不同垄沟覆膜栽培方式在0~40 cm层中土壤酶活性与对照(不覆膜)存在差异:半膜垄侧种植和半膜垄上种植均明显高于对照。以上结果多为沟垄一元覆盖措施下土壤肥力及酶活性和作物产量方面的研究,而沟垄二元覆盖措施对农田土壤肥力及作物生产力影响的研究尚鲜见报道。近年来,对沟垄集雨种植技术的研究主要集中在不同垄沟比^[12]、垄沟覆膜栽培方式^[11]、种植群体优化^[13]、配套节灌技术^[14]等方面,且研究年限较短。为此,本研究在渭北旱塬区连续五年设置不同沟垄二元覆盖模式试验,探讨沟垄二元覆盖模式下土壤肥力、酶活性及对作物生产力的影响,以期为该区进行培肥土壤及玉米高产栽培模式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2007—2011年在陕西省合阳县甘井镇西北农林科技大学旱作农业试验站(北纬35°15',东经110°18',海拔910 m)进行,年均温度10.5℃,年均日照时数2 528 h,无霜期169~180 d。该区年均降雨量为550 mm,其中55%集中在7—9月。2007—2011年玉米生长季降雨量(4—10月)分别为398、330、379、391和420 mm。试验地为旱平地,土壤为壤土,质地属中壤土。2007年试验前茬作物为春玉米。试验前0~20 cm土层土壤pH 8.1,有机质、全氮、全磷和全钾含量分别为13.1、0.8、0.6和7.1 g kg⁻¹,碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为49.0、3.9和135.0 mg kg⁻¹。

1.2 试验设计

2007—2011年采用沟垄种植模式,共设6个处理,除对照外,垄上均覆盖普通地膜,沟内覆盖各种不同材料,具体为:(1) D+D,垄覆地膜+沟覆普通地膜,(2) D+S,垄覆地膜+沟覆生物降解膜,(3) D+J,垄覆地膜+沟覆秸秆,(4) D+Y,垄覆地膜+沟覆液体地膜,(5) D+B,垄覆地膜+沟不覆盖,(6) CK,以传统平作不覆盖作为对

照。每处理3次重复,小区长8.1 m,宽3.6 m,随机排列。

秋季翻耕(耕翻深度25 cm),次年春季整地,播种前30 d在试验地修筑沟垄,沟垄宽均为60 cm,垄高15 cm,起垄时要求垄面细绵平整、垄面呈拱型。沟垄二元覆盖与平作处理均按处理区将基肥尿素(N≥46.4%) 197.2 kg hm⁻²、磷酸二铵(总养分≥60.0%, N:P₂O₅为17:43) 348.8 kg hm⁻²、氯化钾(K₂O≥62.0%) 241.9 kg hm⁻²整地后一次性施入,沟垄二元覆盖处理的肥料集中施于种植沟中,翻入土壤,然后进行覆盖。玉米种在沟内膜垄两侧,株距30 cm,同时将垄面覆盖塑料薄膜。D+D和D+S处理沟内分别覆盖普通地膜(聚乙烯白色薄膜;宽0.8 m,厚0.008 mm)和生物降解膜(合成聚合物和生物材料;宽0.8 m,厚0.008 mm)。玉米秸秆(养分含量分别为全氮6.0 g kg⁻¹、全磷0.6 g kg⁻¹、全钾13.7 g kg⁻¹、有机碳408.4 g kg⁻¹)被切成15 cm长,以9 000 kg hm⁻²的覆盖量均匀覆于D+J区沟内,液体地膜主要是以腐殖酸和植物秸秆等生物质为主要原料,按产品:水为1:5稀释以公司推荐的450 L hm⁻²的总量用手动喷雾器喷施于D+Y区沟内土壤表面。传统平作处理玉米行距60 cm,株距30 cm。

春玉米品种为豫玉22(*Zea mays* L.),分别于2007年4月28日、2008年4月15日、2009年4月26日、2010年于4月25日和2011年4月26日播种,播量均为55 558株 hm⁻²。在7月下旬追施尿素(N≥46.4%) 326.1 kg hm⁻²。于2007年9月15日、2008年9月5日、2009年9月18日、2010年9月17日和2011年9月20日收获。试验期无灌水,定期进行人工拔草。

1.3 样品采集与分析

于2007年播种前及2011年作物收获后,在种植沟内用土钻按5点采样法分别采集各试验区0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm层土样500 g,装入自封袋中带回实验室风干、磨细,过1 mm和0.25 mm筛用于测定土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量;同时取0~20 cm层土壤鲜样200 g,装入自封袋中带回实验室立即放入4℃冰箱中保存待测土壤酶活性。

土壤有机质采用重铬酸钾容量-外加热法测定;土壤全氮采用凯氏定氮法测定;土壤全磷采用浓硫酸-高氯酸-钼锑抗比色法测定;土壤全钾

采用浓硫酸-高氯消煮-火焰光度法测定; 土壤碱解氮采用碱解扩散法测定; 有效磷采用钼锑抗比色法测定; 速效钾采用火焰光度法测定。土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定 (单位 $\text{NH}_3\text{-N mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$); 磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法测定 (单位 $\text{Phenol mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$); 蔗糖酶采用二硝基水杨酸比色法测定 (单位 $\text{Glucose mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$)。

在玉米播种前和收获后, 按每处理区 20 cm 土层分层取样, 分别测定 0~200 cm 层的土壤水分含量, 并计算土壤蓄水量和作物耗水量及水分利用效率。

玉米收获后每个小区选取 10 株有代表性的植株进行室内考种。以小区为单位实收晒干, 换算出单位面积产量。

1.4 数据处理

$$\text{土壤蓄水量: } W = H \times D \times S \times 10 \quad (1)$$

式中, W 为土壤蓄水量 (mm); H 为土层深度 (cm); D 为土壤容重 (g cm^{-3}); S 为土壤质量含水量 (%)。

$$\text{作物耗水量: } \text{ET} = W_1 - W_2 + P \quad (2)$$

式中, ET 为作物耗水量 (mm); W_1 为玉米播前土壤蓄水量 (mm); W_2 为玉米收获后土壤蓄水量 (mm); P 为玉米生育期内有效降雨量 (mm)。

$$\text{水分利用效率: } \text{WUE} = Y/\text{ET} \quad (3)$$

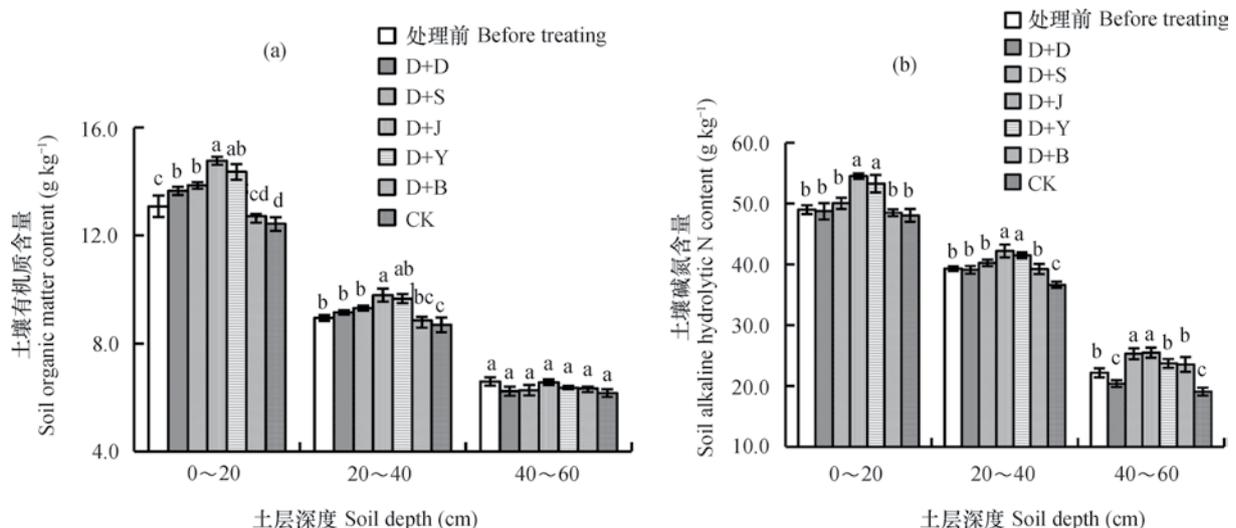
式中, WUE 为水分利用效率, $\text{kg} (\text{hm}^{-2} \text{mm}^{-1})$; Y 为作物产量, kg hm^{-2} ; ET 为作物耗水量 (mm)。

采用 Excel 2003 进行制图, 采用 SAS 进行方差分析, LSD 法用来检测各处理间平均差异。

2 结 果

2.1 沟垄二元覆盖对土壤养分的影响

由图 1a 可知, 0~40 cm 土层, 2011 年玉米收获期沟垄二元覆盖模式下土壤有机质含量与 2007 年试验处理前相比显著增加, 增幅达 3.5%~11.5%, 其中, D+J 和 D+Y 处理土壤有机质含量分别较处理前显著增加 11.5% 和 9.0%; 而 D+B 和 CK 处理土壤有机质含量与试验处理前相比有所下降, 降幅为 2.1%~4.1%。40~60 cm 土层, 2011 年玉米收获期各处理土壤有机质含量较 2007 年处理前有所降低, 降幅为 0.4%~6.5%, 差异不显著。D+D、D+S、D+J、D+Y 处理 0~40 cm 层平均土壤有机质含量分别较 CK 处理显著提高 8.0%、9.7%、16.3% 和 13.7%, 而 40~60 cm 层各处理间差异不显著。沟垄二元覆盖模式下 0~60 cm 层土壤速效养分含量不同。2011 年收获后各处理土壤碱解氮含量与 2007 年试验处理前相比存在差异, 且随土层的加深而降低 (图 1b)。0~60 cm 层土壤碱解氮含量 D+S、D+J、D+Y 处理与处理前增加 4.6%~10.6%, 其中 D+J 处理增加显著。而 D+B、CK 处理与 2007 年处理前有所降低, 其中 CK 处理显著降低 10.2%。0~20 cm 层, D+J 和 D+Y 处理土壤碱解氮含量较 CK 分别显



注: 同一土层内字母不同代表处理间在 $p < 0.05$ 水平下差异显著。下同 Note: Different letters in the figure represent significant differences ($p < 0.05$) between different treatments at the same soil layer. The same below

图1 不同处理0~60 cm 层土壤有机质和碱解氮含量

Fig. 1 Soil organic matter and alkaline hydrolytic N in 0~60 cm layer under different treatments

著增加13.4%和10.9%；D+D和D+S处理土壤碱解氮含量均略高于CK。20~40 cm层，各沟垄二元覆盖处理土壤碱解氮含量均显著高于CK，D+D、D+S、D+J、D+Y和D+B处理碱解氮含量分别较CK提高6.8%、9.9%、15.2%、13.3%和7.2%。40~60 cm层，各沟垄二元覆盖处理碱解氮含量均高于对照，以D+J和D+S处理最为显著。

2011年玉米收获期各处理下0~60 cm层土壤有效磷含量均较2007年试验处理前明显增加，且随土层的加深而降低（图2a）。沟垄二元覆盖各处理0~40 cm层土壤有效磷含量均较2007年试验处理前显著增加33.6%~53.8%，而传统平作处理与处理前增幅不显著。40~60 cm层，沟垄二元覆盖各处理土壤有效磷含量较处理前增加3.7%~29.9%，其中以D+J、D+Y、D+B处理最为显著，而传统平作处理与处理前略有降低，差异不显著。在0~20 cm层，D+J处理土壤有效磷含量最高，较CK显著增

加41.8%；其次为D+D、D+S和D+Y处理，均显著高于CK，分别较CK增加23.4%、24.8%和22.2%。20~40 cm层，各沟垄二元覆盖处理土壤速效磷含量均高于CK，D+S、D+J和D+Y处理分别较CK显著增加43.4%、45.7%和47.4%。40~60 cm层，各沟垄二元覆盖处理有效磷含量均高于对照，其中D+J、D+Y和D+B处理显著高于CK，而D+D、D+S处理和CK差异不显著。如图2b所示，2011年玉米收获期各处理0~20 cm层土壤速效钾含量均显著高于2007年试验处理前，增幅为16.2%~69.1%。20~60 cm层土壤速效钾含量略高于2007年试验处理前2.7%~9.0%，差异不显著。D+J和D+Y处理0~20 cm层土壤速效钾含量分别较CK显著增加75.3%和61.5%；D+B、D+S和D+D处理较CK分别增加14.4%、8.4%和3.1%；20~40 cm层，2011年各沟垄二元覆盖处理土壤速效钾含量均略低于CK；40~60 cm层，各沟垄二元覆盖处理均高于

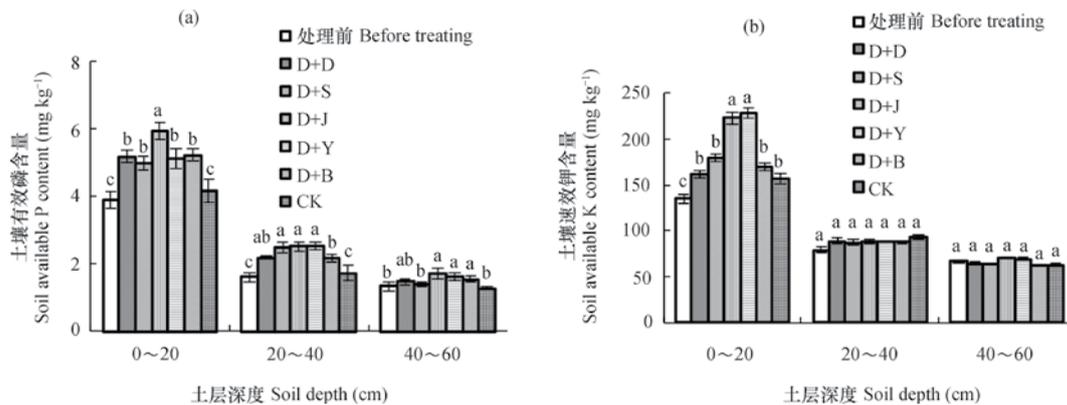


图2 不同处理0~60 cm层土壤有效磷和速效钾含量

Fig. 2 Soil available P and available K content in 0~60 cm soil layer under different treatments

CK，且以D+J和D+Y处理最为显著。

2.2 沟垄二元覆盖对土壤酶活性的影响

表1为不同处理0~20 cm层土壤脲酶、磷酸酶和蔗糖酶活性。2011年玉米收获期，沟垄覆盖D+D、D+S、D+J和D+Y处理下0~20 cm层土壤酶活性均较2007年试验处理前显著提高，而D+B和CK处理较处理前略有降低，但差异不显著。土壤脲酶活性D+J、D+Y、D+D和D+S处理分别显著高于CK处理16.1%、12.2%、12.3%和12.9%，而D+B处理略高于CK，差异不显著。不同处理土壤磷酸酶活性均显著高于对照，以D+J处理最高，较CK提高39.3%；其次为D+D、D+S和D+Y处理，分别较

CK显著提高21.4%、16.9%和19.4%；D+B处理较CK提高10.9%，差异不显著。不同处理土壤蔗糖酶活性均较对照提高，且以D+J处理最高，较CK提高5.7%；D+S处理次之，较CK提高3.5%；D+D、D+Y和D+B处理较CK略有提高，差异不显著。

2.3 沟垄二元覆盖对春玉米产量及水分利用效率的影响

由表2可知，玉米收获期不同沟垄二元覆盖处理下5年平均玉米产量性状均显著高于对照。D+D、D+S、D+J、D+Y和D+B处理穗粒数分别较CK显著提高26.4%、26.0%、26.0%、16.7%和13.7%；百粒重分别较CK提高10.4%、11.1%、

表1 不同处理下0~20 cm层土壤酶活性变化

Table 1 The changes of soil enzyme activities at 0~20 cm layer under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	脲酶Urease (NH ₃ N mg g ⁻¹ d ⁻¹)	磷酸酶Phosphatase (Phenol mg g ⁻¹ d ⁻¹)	蔗糖酶Invertase (Glucose mg g ⁻¹ d ⁻¹)
2007	处理前 Before treating	9.42 ± 1.06c	2.28 ± 0.10bc	3.60 ± 0.58b
2011	D+D	10.42 ± 0.62b	2.44 ± 0.45ab	4.56 ± 0.62a
	D+S	10.48 ± 1.42b	2.35 ± 0.14b	4.69 ± 0.74a
	D+J	11.93 ± 2.13a	2.80 ± 0.26a	4.79 ± 0.36a
	D+Y	11.53 ± 1.87a	2.40 ± 0.48b	4.57 ± 0.65a
	D+B	9.32 ± 0.98c	2.23 ± 0.62bc	3.55 ± 0.37b
	CK	9.28 ± 1.15c	2.01 ± 0.86c	3.53 ± 0.48b

注: 平均值 ± 标准误。同列不同小写字母表示不同处理下差异达显著水平 ($p < 0.05$)。下同 Note: Means ± SE. Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) in same line. The same below

表2 不同处理对玉米产量和水分利用效率的影响

Table 2 Effect of different treatments on maize yield and water use efficiency

处理 Treatment	穗粒数 Number of grains per ear (No)	百粒重 Weight per (g 100 grains ⁻¹)	产量 Yield (kg hm ⁻²)	耗水量 Water consumption (mm)	水分利用效率 Water use efficiency (kg hm ⁻² mm ⁻¹)
D+D	588.9 ± 4.5a	35.5 ± 0.6a	9 965 ± 773a	397.1 ± 6.6a	25.0 ± 1.1a
D+S	587.1 ± 6.8a	35.7 ± 1.1a	10 039 ± 562a	396.4 ± 10.7a	25.3 ± 2.4a
D+J	587.0 ± 5.6a	35.6 ± 0.9a	9 837 ± 388a	395.0 ± 5.4a	24.9 ± 1.5a
D+Y	543.9 ± 3.9b	34.4 ± 1.7b	8 764 ± 414b	388.0 ± 8.9b	22.4 ± 0.8b
D+B	529.8 ± 8.2b	34.0 ± 1.4b	8 620 ± 467b	388.1 ± 6.1b	22.1 ± 1.9b
CK	465.9 ± 7.0c	32.1 ± 2.1c	7 063 ± 512c	384.4 ± 12.5b	18.1 ± 1.4c

10.9%、7.1%和5.7%。D+D、D+S和D+J处理、D+Y和D+B处理下玉米产量差异不显著,但D+D、D+S和D+J处理均显著高于D+Y和D+B处理。玉米籽粒产量高低顺序依次为D+S > D+D > D+J > D+Y > D+B > CK,其籽粒产量分别较CK显著增加41.1%、42.1%、39.3%、24.1%和22.0%,以D+S、D+D和D+J处理增产效果最为显著。D+D、D+S和D+J处理间耗水量差异不显著,D+Y、D+B和CK处理间耗水量亦差异不显著,但D+D、D+S和D+J处理显著高于D+Y、D+B和CK处理。各处理对玉米水分利用效率的影响与产量效果表现一致,水分利用效率高低次序依次为D+S > D+D > D+J > D+Y > D+B > CK,各沟垄二元覆盖处理下玉米水分利用效率分别较对照显著提高38.0%、39.6%、37.0%、23.6%和21.7%。

3 讨论

不同覆盖材料其自身养分含量和形态及试验期间降解程度的不同从而影响土壤中养分含量及分布。覆盖普通地膜的集雨栽培,在一定程度上能够增加表层(0~20 cm)土壤中有效养分含量,在玉米整个生育期生物降解地膜和普通地膜处理的土壤养分含量均高于对照,而两覆膜处理间差异不大^[15],这与本研究结果“垄覆地膜+沟覆生物降解地膜与垄覆地膜+沟覆普通地膜均能增加土壤养分含量,尤其对表层养分的含量效果明显”相似。这主要由于在覆膜栽培条件下,氮素的矿化作用加强,微生物的固定作用减弱,使土壤中有机氮矿化速率增加,造成矿质氮的大量累积,同时微集水种植模式也显著增加了磷、钾的累积^[16]。作物秸秆

含有大量有机质和植物生长所必需的氮、磷、钾及其他微量元素,对土壤有机质和速效养分的影响较大,随着土壤深度增加而逐渐降低^[17-18]。起垄覆膜技术增加了表层土壤水分含量,减弱了土壤表层养分随水分向更深层的流失作用,促进了土壤中有效养分的转化^[5],使垄覆地膜+沟覆秸秆处理表层土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量均较传统平作处理显著增加。本试验中垄覆地膜+沟覆液态地膜处理表层土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量亦较传统平作明显增加,这是由于液态地膜是以腐殖酸和植物秸秆等生物质为主要原料,经过农田覆盖可降解为腐植酸类有机肥、水和二氧化碳^[19],从而成为土壤养分的一部分。因此,液态膜覆盖可明显提高土壤浅层有机碳和速效养分含量。垄覆地膜+沟覆普通地膜和垄覆地膜+沟覆生物降解地膜处理土壤有机质含量较传统平作略有降低,而土壤有效磷和速效钾含量均高于传统平作,但低于其他沟垄二元覆盖处理,这是由于地膜覆盖显著的保水增温作用促进了上层土壤有机质的分解和氮素的释放^[20]。本研究还发现,垄覆地膜+沟不覆盖和传统平作处理土壤有机质和速效养分的含量与试验处理前相比有所下降,这是由于沟垄不覆盖和传统平作模式下土壤水温环境较差,使土壤酶的活性降低,减缓了土壤中有机质的合成和速效养分的转化。

土壤酶活性易受气候条件、土壤水分、温度、养分及土壤生物类群等多种因素影响,沟垄覆盖种植可改善土壤水温肥环境,对土壤酶的活性产生影响^[11]。汪景宽和张继宏^[21]研究结果表明,覆膜可使土壤过氧化氢酶活性降低,蔗糖转化酶活性提高。李倩等^[22]研究发现,不同数量秸秆覆盖可增加碱性磷酸酶、蔗糖酶和脲酶活性。杨青华等^[23]研究认为,适量的液体地膜覆盖农田能强土壤脲酶、中性磷酸酶和多酚氧化酶活性。在本研究中,沟垄二元覆盖处理改善了土壤微环境和微生物活性,使土壤酶活性增强。垄覆地膜+沟覆秸秆和垄覆地膜+沟覆液态地膜处理表层土壤脲酶、磷酸酶和蔗糖酶活性均较传统平作显著增加,这是因为秸秆覆盖和液体地膜覆盖可使表层土壤积累丰富的腐殖质,同时较好的土壤水热条件和通气状况,利于微生物的生长和繁殖,因而表层土壤酶活性较高^[24]。垄覆地膜+沟覆普通地膜和垄覆地膜+沟覆生物降解地膜处理土壤酶活性均较传统平作提高,

这与地膜和生物降解膜较好的增温保墒作用可促进养分的释放,进而提高土壤酶活性有关^[25]。

Li等^[26]研究发现,沟垄覆膜集雨种植模式均较传统平作显著提高玉米产量和水分利用效率,而沟垄覆盖模式下的增产效果依赖于生长季的降雨量^[27]。不同覆盖材料的增温保墒效果不同,其对作物产量及水分利用效率的影响亦不同^[28]。在本研究中,沟垄二元覆盖模式下沟覆地膜和生物降解膜处理均能显著增产,作物水分利用效率较传统平作显著提高,究其原因主要是垄覆地膜+沟覆普通地膜和垄覆地膜+沟覆生物降解地膜处理可进一步抑制玉米种植沟内土壤水分的无效蒸发,调节沟内土壤水温状况,明显增加玉米的百粒重和穗粒数,从而提高作物产量和水分利用效率^[29]。王敏等^[28]的研究表明,与平作相比,秸秆覆盖处理显著降低了玉米穗长和百粒重,造成玉米减产,而本研究发现,垄覆地膜+沟覆秸秆处理的土壤水分状况较好,同时垄上覆盖地膜的增温效果在一定程度上可弥补低温效应对玉米生长的影响,使其产量和水分利用效率较对照显著提高。张春艳和杨新民^[30]的研究表明,覆盖液体地膜较平作增产17.4%。本研究发现,垄覆地膜+沟覆液态地膜和垄覆地膜+沟不覆盖处理产量和水分利用效率较传统平作显著差异,但与垄覆地膜+沟覆普通地膜和垄覆地膜+沟覆生物降解地膜处理相比效果较差。这主要与液体地膜喷施后成膜效果易受外界环境条件影响,导致增产效果不稳定有关。

4 结 论

实施沟垄二元覆盖措施可增加土壤有机质、氮磷钾养分含量,其中对表层(0~20 cm)土壤有效磷含量的增幅明显优于速效钾和碱解氮含量。垄覆地膜沟覆秸秆处理土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量最高,均显著高于传统平作,垄覆地膜沟覆液态地膜处理次之,而垄覆地膜沟覆地膜和垄覆地膜沟覆生物降解膜处理土壤有机质及速效养分含量与对照差异不显著。沟垄二元覆盖措施显著提高了土壤脲酶、磷酸酶和蔗糖酶活性,各沟垄二元覆盖处理表层土壤脲酶、磷酸酶和蔗糖酶活性均较对照明显增加,其中以垄覆地膜沟覆秸秆处理最为显著,垄覆地膜沟覆液态地膜处理次之。沟垄二元覆盖措施可显著提高春玉米产量和水分利用效率,

以垄覆地膜沟覆秸秆处理玉米增产及提高水分利用效率的效果最佳, 垄覆地膜沟覆地膜和垄覆地膜沟覆生物降解膜处理次之。

参 考 文 献

- [1] 曾广伟, 兰进好, 刘义国, 等. 不同土壤水分条件下施磷对小麦光合性能和产量影响比较. 干旱地区农业研究, 2009, 27 (5) : 41—46
Zeng G W, Lan J H, Liu Y G, et al. Comparison of effects of different soil water conditions and phosphorus application on photosynthesis and yield of wheat (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27 (5) : 41—46
- [2] Carter D C, Miller S. Three years experience with on-farm water catchment water harvesting systems in Botswana. *Agricultural Water Management*, 1991, 19 (3) : 191—203
- [3] Wang X L, Li F M, Jia Y, et al. Increasing potato yields with additional water and increased soil temperature. *Agricultural Water Management*, 2005, 78 (3/5) : 181—194
- [4] 王殿武, 程东娟, 刘树庆, 等. 高寒半干旱区马铃薯聚垄集肥覆膜技术效应. 干旱地区农业研究, 2001, 19 (1) : 14—19
Wang D W, Cheng D J, Liu S Q, et al. Effect of ridging and fertilization and plastic film covering technique for potato in semiarid region with cold climate and high elevation (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2001, 19 (1) : 14—19
- [5] 任小龙, 贾志宽, 陈小莉. 不同模拟雨量下微集水种植对农田水肥利用效率的影响. 农业工程学报, 2010, 26 (3) : 75—81
Ren X L, Jia Z K, Chen X L. Effect of micro-catchment rainwater harvesting on water and nutrient use efficiency in farmland under different simulated rainfall conditions (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2010, 26 (3) : 75—81
- [6] 王珂, 卫婷, 董昭芸, 等. 集雨种植模式下不同施肥水平对土壤水分消耗及冬小麦产量的影响. 干旱地区农业研究, 2016, 34 (1) : 93—98, 200
Wang K, Wei T, Dong Z Y, et al. Effects of fertilizer application rates on soil water use and wheat yield under ridge-furrow practice with plastic mulching of the ridge (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34 (1) : 93—98, 200
- [7] Zhou L M, Jin S L, Liu C A, et al. Ridge-furrow and plastic-mulching tillage enhances maize soil interactions: Opportunities and challenges in a semiarid agro-ecosystem. *Field Crops Research*, 2012, 126: 181—188
- [8] 秦舒浩, 代海林, 张俊莲, 等. 沟垄覆膜对旱作马铃薯土壤养分运移及产量的影响. 干旱地区农业研究, 2014, 32 (1) : 38—41, 71
Qin S H, Dai H L, Zhang J L, et al. Effects of plastic film and ridge-furrow cropping patterns on soil nutrients movement and yield of potato in semiarid areas (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32 (1) : 38—41, 71
- [9] 慈恩, 王莲阁, 丁长欢, 等. 垄作免耕对稻田垄埂土壤有机碳累积和作物产量的影响. 土壤学报, 2015, 52 (3) : 576—586
Ci E, Wang L G, Ding C H, et al. Effects of no-tillage ridge-cultivation on soil organic carbon accumulation in ridges and crop yields in paddy fields (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (3) : 576—586
- [10] 王彩绒, 田霄鸿, 李生秀. 覆膜集雨栽培对冬小麦产量及养分吸收的影响. 干旱地区农业研究, 2004, 22 (2) : 108—111
Wang C R, Tian X H, Li S X. Effects of cultivation by mulching and rain harvesting on yield and nutrient uptake of winter wheat (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22 (2) : 108—111
- [11] 曹莉, 秦舒浩, 张俊莲, 等. 垄沟覆膜栽培方式对马铃薯土壤酶活性及土壤微生物数量的影响. 甘肃农业大学学报, 2012, 47 (3) : 42—46
Cao L, Qin S H, Zhang J L, et al. Influence of different ridge-furrow film cultivation patterns on rhizospheric soil microorganism quantity and soil enzyme activity of potato (In Chinese). *Journal of Gansu Agricultural University*, 2012, 47 (3) : 42—46
- [12] Wang Q, Ren X, Song X Y, et al. The optimum ridge-furrow ratio and suitable ridge covering material in rainwater harvesting for oats production in semiarid regions of China. *Field Crops Research*, 2015, 172: 106—118
- [13] 刘启, 贾志宽, 连延浩, 等. 沟垄集雨种植模式下谷子种植密度对土壤水分及产量的影响. 干旱地区农业研究, 2016, 34 (2) : 81—87
Liu Q, Jia Z K, Lian Y H, et al. Effects of planting density on water consumption and yield of foxtail millet under ridge-furrow rainfall harvesting planting mode (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34 (2) : 81—87
- [14] Wu Y, Jia Z K, Ren X L, et al. Effects of ridge and furrow rainwater harvesting system combined with irrigation on improving water use efficiency of maize (*Zea mays* L.) in semi-humid area of China.

- Agricultural Water Management, 2015, 158: 1—9
- [15] 王星, 吕家珑, 孙本华. 覆盖可降解地膜对玉米生长和土壤环境的影响. 农业环境科学学报, 2003, 22 (4): 397—401
Wang X, Lü J L, Sun B H. Effects of covering degradable films on corn growth and soil Environment (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22 (4): 397—401
- [16] 李华. 栽培模式对冬小麦产量形成和养分利用的影响. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2006
Li H. Effects of cultivation methods on grain yield formation and nutrient use of winter wheat (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2006
- [17] 巩杰, 黄高宝, 陈利顶, 等. 旱作麦田秸秆覆盖的生态综合效应研究. 干旱地区农业研究, 2003, 21 (3): 69—73
Gong J, Huang G B, Chen L D, et al. Comprehensive ecological effect of straw mulch on spring wheat field in dryland area (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21 (3): 69—73
- [18] 郭洋, 李香兰, 王秀君, 等. 干旱半干旱区农田土壤碳垂直剖面分布特征研究. 土壤学报, 2016, 53 (6): 1433—1443
Guo Y, Li X L, Wang X J, et al. Profile distribution of soil inorganic and organic carbon in farmland in arid and semi-arid areas of China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (6): 1433—1443
- [19] 陈伟通, 罗锡文, 周志艳, 等. 液体地膜覆盖对直播稻抵御芽期低温的效果. 华南农业大学学报, 2010, 31 (1): 99—101
Chen W T, Luo X W, Zhou Z Y, et al. Effects of liquid film mulching on cold resistance of direct-seeding rice at early seedling stage (In Chinese). Journal of South China Agricultural University, 2010, 31 (1): 99—101
- [20] 谢驾阳, 王朝辉, 李生秀, 等. 地表覆盖对西北旱地土壤有机氮累积及矿化的影响. 中国农业科学, 2010, 43 (3): 507—513
Xie J Y, Wang Z H, Li S X, et al. Effects of different surface mulching on soil organic nitrogen accumulation and mineralization in dryland of northwestern China (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43 (3): 507—513
- [21] 汪景宽, 张继宏. 地膜覆盖对土壤肥力影响的研究. 沈阳农业大学学报, 1992, 23 (z09): 32—37
Wang J K, Zhang J H. Effect of plastic film mulch on soil fertility (In Chinese). Journal of Shenyang Agricultural University, 1992, 23 (z09): 32—37
- [22] 李倩, 张睿, 贾志宽. 玉米旱作栽培条件下不同秸秆覆盖量对土壤酶活性的影响. 干旱地区农业研究, 2009, 27 (4): 152—154
Li Q, Zhang R, Jia Z K. Effect of different amount of straw mulching on soil enzyme activities in dry land (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27 (4): 152—154
- [23] 杨青华, 韩锦峰, 贺德先. 液体地膜覆盖对棉田土壤微生物和酶活性的影响. 生态学报, 2005, 25 (6): 1312—1317
Yang Q H, Han J F, He D X. Effects of liquid film on the quantity of microorganisms and activity of enzymes in a cotton field (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (6): 1312—1317
- [24] 杨青华, 韩锦峰. 棉田不同覆盖方式对土壤微生物和酶活性的影响. 土壤学报, 2005, 42 (2): 348—351
Yang Q H, Han J F. Effects of mulching on soil microorganisms and enzyme activities in cotton field (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42 (2): 348—351
- [25] 温晓霞, 殷瑞敬, 高茂盛, 等. 不同覆盖模式下旱作苹果园土壤酶活性和微生物数量时空动态研究. 西北农业学报, 2011, 20 (11): 82—88
Wen X X, Yin R J, Gao M S, et al. Spatiotemporal dynamics of soil enzyme activities and microbes in apple orchard soil under different mulching managements (In Chinese). Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2011, 20 (11): 82—88
- [26] Li X Y, Gong J D, Gao Q Z, et al. Incorporation of ridge and furrow method of rainfall harvesting with mulching for crop production under semi-arid conditions. Agricultural Water Management, 2001, 50 (3): 173—183
- [27] Tian Y, Su D R, Li F M, et al. Effect of rainwater harvesting with ridge and furrow on yield of potato in semiarid areas. Field Crops Research, 2003, 84 (3): 385—391
- [28] 王敏, 王海霞, 韩清芳, 等. 不同材料覆盖的土壤水温效应及对玉米生长的影响. 作物学报, 2011, 37 (7): 1249—1258
Wang M, Wang H X, Han Q F, et al. Effects of different mulching materials on soil water, temperature, and corn growth (In Chinese). Acta Agronomica Sinica, 2011, 37 (7): 1249—1258
- [29] 李荣, 侯贤清, 贾志宽, 等. 沟垄全覆盖种植方式对旱地玉米生长及水分利用效率的影响. 生态学报, 2013, 33 (7): 2282—2291
Li R, Hou X Q, Jia Z K, et al. Effects of planting with ridge and furrow mulching on maize growth, yield and water use efficiency in dryland farming (In Chinese).

Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (7): 2282—2291

- [30] 张春艳, 杨新民. 液态地膜对玉米生长及产量的影响. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2008, 25 (3): 227—230

Zhang C Y, Yang X M. Affects of liquid film on growth and yield of maize (In Chinese). Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 2008, 25 (3): 227—230

Effects of Dual-mulching of Ridge and Furrow on Soil Fertility and Maize Yield in the Weibei Tablelands

LI Rong¹ HOU Xianqing¹ JIA Zhikuan^{2, 3†}

(1 School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

(2 Chinese Institute of Water-Saving Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 Key Laboratory of Crop Physi-Ecology and Tillage Science in Northwestern Loess Plateau, Ministry of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100 China)

Abstract 【Objectives】 A five-year field experiment was conducted between 2007 and 2011 in the Weibei tablelands of Shaanxi, China to determine effect of different patterns of dual-mulching of ridge and furrow on soil fertility (soil organic matter and available nitrogen, phosphorus, potassium contents), enzyme activity (urease, phosphatase and sucrase) and crop productivity (maize yield and water use efficiency) in an attempt to provide some important theoretical and practical basis for perfecting micro-catchment crop cultivation in the sub-humid areas. 【Methods】 In a tract of farmland under the ridge and furrow rainwater harvest system (RFRHS), ridges were covered with plastic film and furrows mulched with common plastic film, bio-degradable film, maize straw or liquid film, or left uncovered, and a tract of flat farmland under conventional cultivation without mulching, which is popular among local farmers, was used as control. 【Results】 After the spring maize was harvested in 2011, soil organic matter and available nutrients in all the treatments decreased in content with soil depth. Soil nutrients in the dual-mulching treatments obviously increased in content when compared with the initial background value in 2007, but decreased in the treatment that had ridges mulched and furrows uncovered and the control. The treatment that had ridges mulched with plastic film and furrows mulched with straw was significantly higher than the control in content of soil organic matter, alkalytic nitrogen, available phosphorus and readily available potassium in the 0~20 cm soil layer, and the treatment that had both ridges and furrows mulched with plastic film and the treatment that had ridges mulched with plastic film and furrows with bio-degradable film were somewhat higher than the control in content of soil organic matter alkalytic nitrogen, but significantly higher in content of available phosphorus and readily available potassium. All the dual-mulching treatments were slightly higher than the control in content of soil organic matter and available nutrients in the 20~60 cm soil layer, and in activity of urease, phosphatase and sucrase in the 0~20 cm soil layer, too. The treatment that had ridges mulched with plastic film and furrows with straw was the highest in activity of soil enzymes, and followed by the treatment that had both ridges and furrows mulched with the plastic film and the treatment that had ridges mulched with plastic film and furrows with bio-degradable film. Dual-mulching significantly increased maize yield water use efficiency in the region. The treatment that had ridges mulched with plastic film and furrows with bio-degradable film, the treatment that had both ridges and furrows mulched with plastic film and the treatment that had ridges mulched with plastic film and furrows with straw was 41.1%, 42.1% and 39.3%, respectively, higher than the control in maize yield and 38.0%, 39.6% and 37.0% in water use efficiency.

【Conclusions】 The dual-mulching technology has been demonstrated as an effective practice to improve soil fertility, promote soil enzyme activity and increase crop yield and water use efficiency in the Weibei tablelands. In terms of the effect, the treatment that has ridges mulched with plastic film and furrows with straw ranks first, and is followed by the treatment that has both ridges and furrows mulched with plastic film and the treatment that has ridges mulched with plastic film and furrows with bio-degradable film. Apparently, the technology is feasible and worth extrapolating for spring maize production in the rainfed agricultural zones of the Loess Plateau, China.

Key words Dual-mulching with ridge and furrow; Soil nutrient; Soil enzyme activity; Crop productivity; Water use efficiency

(责任编辑: 卢 萍)