

白雪,周怀平,解文艳,等.不同类型地膜覆盖对玉米农田土壤酶活性的影响[J].农业资源与环境学报,2018,35(4):381-388.

BAI Xue, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, et al. Effects of different plastic film mulching on soil enzyme activity in maize farmland[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(4): 381-388.

不同类型地膜覆盖对玉米农田土壤酶活性的影响

白雪^{1,2}, 周怀平², 解文艳^{2*}, 杨振兴², 程曼², 杜艳玲¹

(1.山西大学生物工程学院, 太原 030006; 2.山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 太原 030031)

摘要:为探讨不同类型地膜覆盖下农田土壤酶活性变化特征,试验设置普通地膜覆盖(P)、渗水地膜覆盖(SS)、生物降解地膜覆盖(SW)和光降解地膜覆盖(G)4种不同类型地膜覆盖模式,以露地不铺膜覆盖(CK)为对照,研究不同类型地膜覆盖方式对玉米农田土壤酶活性的影响。结果表明:SS、G、SW和P4种覆膜处理下的碱性磷酸酶和硝酸还原酶在各个生育期内都较CK高,而覆膜之后的脲酶、过氧化氢酶和亚硝酸还原酶则较CK有所降低;大喇叭口期的土壤脲酶活性最高,不同处理间表现为CK>G>SW>SS>P;收获期的土壤碱性磷酸酶活性最高,SS、SW、P和G处理在0~20 cm土层较CK增幅分别为16.17%、18.97%、16.34%和14.56%,土壤硝酸还原酶活性也是收获期最高,SS、SW、P和G处理在0~20 cm土层分别较CK高68.57%、42.86%、42.86%和25.71%;土壤碱性磷酸酶与硝酸还原酶活性的变化均与土壤呼吸率和玉米产量呈极显著正相关($P<0.01$),各个生育期的土壤水热和施肥状况不同也会引起土壤酶活性的相应变化。其中,SW和SS处理在玉米生育前期的保温保墒作用最明显,产量最高,相应的碱性磷酸酶和硝酸还原酶活性也最高。因此,生物降解地膜由于其降解特性能达到缓解农田残膜污染的效果,在未来可替代普通地膜推荐应用到旱地玉米中。

关键词:地膜覆盖;土壤酶活性;土壤呼吸率;土壤水热动态;玉米产量

中图分类号:S153.62,S152.4 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-6819(2018)04-0381-08 **doi:**10.13254/j.jare.2018.0033

Effects of different plastic film mulching on soil enzyme activity in maize farmland

BAI Xue^{1,2}, ZHOU Huai-ping², XIE Wen-yan^{2*}, YANG Zhen-xing², CHENG Man², DU Yan-ling¹

(1.College of Biological Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2.Institute of Agricultural Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of soil enzyme activities under different types of plastic film mulching, we set up four different types of plastic film mulching models at Dongyang experimental base of Agricultural Sciences Academy in Shanxi Province in 2016, including common plastic film mulching (P), water-permeable plastic mulching film (SS), biodegradable plastic film mulching (SW), light degradation mulching (G), uncovered film covering in open field (CK) was used as control. The results showed that alkaline phosphatase and nitrate reductase under four kinds of coating treatments were higher than CK in all growth stages, while urease, catalase, and nitrite reductase under plastic film were lower than CK; Soil urease activity was highest in flare opening stage, with CK>G>SW>SS>P; Alkaline phosphatase activity was highest during harvest, SS, SW, P, and G treatments at 0~20 cm soil were 16.17%, 18.97%, 16.34%, and 14.56% higher than CK. The activity of nitrate reductase at 0~20 cm soil of SS, SW, P, and G treatments were 68.57%, 42.86%, 42.86%, and 25.71% higher than that of CK; Combining other factors such as maize yield, we found that the changes of soil alkaline phosphatase activity and nitrate reductase activity were highly significant positively correlated with soil respiration rate and maize yield ($P<0.01$). Soil hydrothermal and fertilization conditions at different growth stages caused corresponding changes in soil enzyme activity. Among them, SW and SS treatments had obviously effects on the temperature raising and water saving of maize soil during the early growth period, they also had the highest yield, with the highest corresponding alkaline phosphatase activity and nitrate reductase activity, and SW had considerable degradation performance.

收稿日期:2018-01-25 录用日期:2018-03-30

基金项目:山西省农业科学院博士研究基金项目(YBSJJ1615,YBSJJ1614);山西省重点研发计划重点项目(201603D2110-5,201703D211002-3)

作者简介:白雪(1992—),女,山西忻州人,硕士研究生,研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail:1904128986@qq.com

*通信作者:解文艳 E-mail:xwy6018060@163.com

Therefore, biodegradable plastic film in the future can be used as an alternatives of common mulch film applied to dry farmland, at the same time, it can achieve the effect of relieving farmland residual film pollution.

Keywords: mulching; soil enzyme activity; soil respiration rate; soil hydrothermal dynamics; maize yield

地膜覆盖栽培具有增温保墒增产的作用,是干旱半干旱地区提高粮食产量的一个重要途径,但残膜污染也是当前迫切需要解决的问题。近年来,针对地膜的保水性能和污染问题,地膜类型出现多样化。光降解和生物降解地膜是两种主要的可降解类型地膜,其增温保墒增产性能能否替代普通地膜尚需深入研究。另外,山西省自主研发的渗水地膜,利用了单向渗水原理,微孔通透的材料结构能够充分利用春季小型降雨,在山西省应用较广。

地膜覆盖改变了土壤温度、水分和空气等要素,使得土壤微环境发生变化。作为土壤生物化学特性重要的组成部分,土壤酶活性在营养物质转化和有机质分解等方面起着重要的催化作用,其活性大小不仅是评价土壤肥力和质量的重要指标,也体现了土壤中生物化学反应的方向和强度^[1-3]。在参与土壤中的物质循环和能量代谢过程中,土壤酶将农田生态系统的各个组分的功能联系在一起,成为陆地生态系统中最活跃的部分之一^[4]。其中,与氮素和磷素转化相关的脲酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶及磷酸酶等都能较大幅度地反映土壤的供肥状况。土壤类型、土壤质地、土壤水热状况、土壤空气通透性、施肥状况、土壤生物活动、微生物活性、土壤养分、pH 值以及作物生长情况和作物根系分泌物、呼吸强度等都会影响酶活性的变化^[5]。近年来,对覆膜与未覆膜之间的酶活性变化研究已有报道,而结合作物生育期的多种不同类型地膜的酶活性研究则鲜见。因此,本研究进行了不同类型地膜覆盖试验,分析对比了不同地膜覆盖措施对几种土壤酶活性的影响,结合不同类型地膜覆盖下的土壤水热状况和玉米产量变化,探索适宜当地生产和生态的最佳地膜覆盖方式,为合理应用各类地膜覆盖栽培技术提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2016 年在山西省榆次东阳镇农科院研究基地进行。东阳镇位于山西省晋中市,属典型的暖温带大陆性气候,多年平均降水量 400~650 mm, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温 3700°C 左右,无霜期 160 d; 试验地土壤为潮褐土,质地是黄黏土,有机质 $11.13\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮

$1.17\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $37.83\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $217.79\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

在榆次东阳镇农科院研究基地设计 5 个不同类型地膜覆盖试验,即:普通地膜覆盖(P)、渗水地膜覆盖(SS)、光降解地膜覆盖(G)、生物降解地膜覆盖(SW)、露地不覆膜(CK)对照,地膜覆盖时间为春玉米全生育期,每个处理设 3 次重复,每个处理小区面积 115 m^2 。所有处理均施用 $\text{N } 225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $117\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 K_2O $49\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。种植制度为一年一季玉米,供试玉米品种为大丰 30,密度 $6.6\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。播前旋耕施肥,之后沟播覆膜放苗,2016 年 5 月 4 日播种,9 月 29 日收获。普通地膜厚度 0.008 mm ;渗水地膜厚度 0.006 mm ,山西三水渗水膜科技发展中心生产;光降解地膜厚度 0.008 mm ,吉林省白山市喜丰塑业生产;生物降解地膜厚度 0.012 mm ,青岛宏达塑胶总公司生产。4 种地膜宽幅均为 120 cm ,一幅地膜种植 3 行玉米,行距 60 cm ,株距 30 cm 。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 样品的采集

试验土壤分别于苗期、拔节期、大喇叭口期和收获期取样,每个处理均采取 $0\sim 20\text{ cm}$ 、 $20\sim 40\text{ cm}$ 两层土样,风干处理之后过 1 mm 筛使用。

1.3.2 测定项目与方法

土壤温度的测定:在各个处理中间插入地温计,测定 5 、 10 、 15 、 20 、 25 cm 处的地温,每个生育期连续测定 3 d ,每日 $6:00\sim 18:00$ 间隔 2 h 测定记录 1 次。

土壤水分的测定:在田间用土钻采取新鲜土样,采用铝盒烘干称重法测量土壤质量含水量,准确至 0.01 g ,利用土壤贮水量公式计算 $0\sim 60\text{ cm}$ 土层的土壤贮水量。

玉米产量的测定:在玉米收获后进行田间采样,按试验设置小区收获的实际玉米穗数,称重折算各处理玉米产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

土壤呼吸率测定:LCi 便携式光合仪器。

土壤酶活性测定:脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法;碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠法;过氧化氢酶活性采用高锰酸钾(浓度为 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)滴定法;硝酸还原酶活性采用 2,4 二硝基酚比色法;亚硝

酸还原酶活性采用亚硝酸钠比色法。

1.3.3 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 和 SPSS 进行数据的统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同覆膜处理对各个生育期土壤脲酶活性的影响

土壤脲酶是土壤氮循环过程的一种重要酶种,它能促进尿素的水解并形成 NH_4^+ , 为植物重要的氮源之一,有利于植物对氮素的吸收和利用,可反映土壤的供氮能力;此外,土壤脲酶也可以加速土壤潜在养分的有效化^[6]。从表 1 可知,整个生育期内,脲酶活性的变化规律表现为:大喇叭口期>拔节期>苗期>收获期,呈先增大后减小趋势,最大峰值出现在大喇叭口期,最低值在收获期;0~20 cm 土层的脲酶活性均高于 20~40 cm。以 0~20 cm 土层为例,4 种覆膜处理下的土壤脲酶活性均低于 CK,而覆膜处理之间在苗期

和拔节期内无明显差异,G、SW 和 SS 处理则在收获期因降解或生物量大小与其他处理出现稍大差异。SW、P、SS 和 G 处理在苗期 0~20 cm 处较 CK 的降幅分别为 11.3%、11.2%、11.0%和 9.5%;大喇叭口期后处理之间的差异逐渐增大,降幅分别达到 9.8%、10.7%、10.6%和 9.6%。总体来说,4 种覆膜处理下的脲酶活性均低于 CK,在不同生育期内呈现出不同的变化规律,其中,SW、SS 和 G 处理的变动幅度较大,说明这 3 种处理对土壤脲酶活性的影响较大。

2.2 不同覆膜处理对各个生育期土壤碱性磷酸酶活性的影响

土壤碱性磷酸酶是土壤微生物生命活动和植物根系分泌产生的酶种之一,与土壤有机质转化和腐殖质的形成密切相关,它能促进有机磷化合物的水解,加速有机磷的脱磷速度,提高土壤磷素的有效性,反映土壤的供磷水平,是评价土壤磷素肥力的重要指标^[7-8]。从表 2 可以看出,4 种覆膜处理下的土壤

表 1 不同地膜覆盖后的脲酶活性变化($\text{mg NH}_3\text{-N}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$)
Table 1 Changes of soil URE activity after plastic mulching($\text{mg NH}_3\text{-N}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$)

处理	土层	苗期	拔节期	大喇叭口期	收获期
CK	0~20 cm	1.756±0.008a	1.795±0.005a	1.817±0.005a	1.688±0.010a
	20~40 cm	0.871±0.009a	1.010±0.006a	1.114±0.013a	0.731±0.007a
SS	0~20 cm	1.563±0.002b	1.617±0.007b	1.624±0.005c	1.542±0.010bc
	20~40 cm	0.814±0.032b	0.954±0.011c	1.001±0.006c	0.652±0.007cd
SW	0~20 cm	1.558±0.003b	1.611±0.011b	1.639±0.005b	1.550±0.005b
	20~40 cm	0.759±0.006c	0.922±0.016d	1.098±0.008a	0.639±0.002d
G	0~20 cm	1.589±0.049b	1.611±0.005b	1.642±0.005b	1.545±0.005b
	20~40 cm	0.844±0.005a	0.976±0.002b	1.020±0.007b	0.693±0.022c
P	0~20 cm	1.559±0.006b	1.609±0.013b	1.623±0.010c	1.540±0.003c
	20~40 cm	0.770±0.005c	0.915±0.009d	0.960±0.007d	0.664±0.005b

注:不同字母表示同一生育期的同一土层的酶活性处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

表 2 不同地膜覆盖后的碱性磷酸酶活性变化($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$)
Table 2 Changes of soil alkaline phosphatase activity after plastic mulching($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$)

处理	土层	苗期	拔节期	大喇叭口期	收获期
CK	0~20 cm	1.074±0.038b	1.093±0.023c	1.150±0.025c	1.181±0.019c
	20~40 cm	0.741±0.008b	0.776±0.032c	0.784±0.004d	0.831±0.033e
SS	0~20 cm	1.353±0.021a	1.374±0.019ab	1.398±0.022a	1.405±0.004a
	20~40 cm	0.905±0.025a	0.969±0.008a	1.057±0.015a	1.086±0.021a
SW	0~20 cm	1.377±0.027a	1.386±0.022a	1.393±0.021a	1.372±0.027b
	20~40 cm	0.926±0.035a	0.972±0.032a	0.998±0.011b	1.024±0.031b
G	0~20 cm	1.336±0.004a	1.343±0.004b	1.346±0.031b	1.353±0.019b
	20~40 cm	0.891±0.021a	0.903±0.007b	0.915±0.016c	0.926±0.004d
P	0~20 cm	1.346±0.019a	1.348±0.023b	1.350±0.015b	1.374±0.007ab
	20~40 cm	0.900±0.011a	0.934±0.011ab	0.974±0.036b	0.981±0.000c

碱性磷酸酶活性均高于不覆膜对照 CK;0~20 cm 土层的碱性磷酸酶活性均高于 20~40 cm。土壤碱性磷酸酶在整个生育期表现为收获期>大喇叭口期>拔节期>苗期。其中,SS 和 SW 处理在苗期的土壤磷酸酶活性与 CK 相比增幅较大,0~20 cm 处的活性增幅分别为 26.0%和 28.2%,P 和 G 处理的增幅分别是 25.3%、24.4%。至收获期,SW、SS、P 和 G 处理分别较 CK 高 16.17%、18.97%、16.34%和 14.56%。总体来说,4 种覆膜处理下的碱性磷酸酶活性均高于 CK,在玉米生育前期均呈现出 SW>SS>P>G>CK,说明 SW 和 SS 两处理对土壤碱性磷酸酶活性的影响较大。

2.3 不同覆膜处理对各个生育期土壤过氧化氢酶活性的影响

土壤过氧化氢酶能够促进对生物体有毒害作用的过氧化物分解,从而避免过氧化物在生物体内积累对机体产生伤害。过氧化氢的分解产物——氧,能促进生物体对各种化合物的氧化,为植物生长提供必要的营养物质。土壤过氧化氢酶在一定程度上较灵敏地反映了土壤微生物学过程和作物代谢过程的强度,是较好的土壤微生态环境指示因子^[9-11]。

从表 3 可以看出,4 种覆膜处理下的土壤过氧化氢酶活性均低于不覆膜对照 CK。与其他酶活性不同,过氧化氢酶的 0~20 cm 处活性反而比 20~40 cm 处低一些。整个生育期对照 CK 的过氧化氢酶活性表现为大喇叭口期>拔节期>苗期>收获期,而覆膜处理则有不同规律。其中,对玉米生长发育最重要的苗期,SW 处理的土壤过氧化氢酶活性与 CK 在 0~20 cm 处的差异最显著,降幅为 13.4%,SS、P 和 G 处理的降幅分别是 13.1%、13.2%和 12.8%。总体来说,4 种覆膜处理下的过氧化氢酶活性均低于 CK,但四者差异并不显著,在

玉米生育前期大致呈现出 SW<P<SS<G<CK,说明 SW 处理对土壤过氧化氢酶活性的影响最大。

2.4 不同覆膜处理对各个生育期土壤硝酸还原酶活性的影响

土壤硝酸还原酶是反硝化作用过程中的重要酶种,参与土壤硝态氮的还原并在嫌气厌氧条件下催化硝酸盐(NO_3^-)还原为亚硝酸盐(NO_2^-),能够反映土壤氮素的损失情况,是植物氮代谢中一个重要的调节酶和限速酶,对研究合理施肥、降低氮素损失具有重要意义^[1,3,12]。表 4 显示:4 种覆膜处理下的硝酸还原酶活性均高于不覆膜对照 CK;0~20 cm 土层活性均高于 20~40 cm;整个生育期的土壤硝酸还原酶活性表现为收获期>苗期>大喇叭口期>拔节期。其中,SS 和 SW 处理在苗期的土壤硝酸还原酶活性与 CK 相比差异显著,在 0~20 cm 处的活性增幅分别为 70.8%和 87.5%,P 和 G 处理的增幅分别是 45.8%和 12.5%。SS、SW、P 和 G 处理在收获期 0~20 cm 土层分别较 CK 高 68.57%、42.86%、42.86%和 25.71%。总体来说,4 种覆膜处理下的硝酸还原酶活性均高于 CK。其中,SW 在玉米生育前期相对 CK 来说的增幅最大,说明其对土壤硝酸还原酶活性的影响最大。

2.5 不同覆膜处理对各个生育期土壤亚硝酸还原酶活性的影响

亚硝酸还原酶催化土壤中的 NO_2^- 转化为 NH_2OH 或 H_2O ,也是土壤氮素反硝化作用过程中的重要酶种,其活性大小影响着温室气体氮氧化物的排放^[12-15]。表 5 显示:整个生育期的土壤亚硝酸还原酶活性表现为苗期>收获期>拔节期>大喇叭口期,但活性值差异微小。从土层深度来说,除大喇叭口期以外,0~20 cm 土层内的亚硝酸还原酶活性都略高于 20~40 cm 处。4

表 3 不同地膜覆盖后的过氧化氢酶活性变化($\text{mL KMnO}_4 \cdot \text{g}^{-1}$)
Table 3 Changes of soil catalase activity after plastic mulching($\text{mL KMnO}_4 \cdot \text{g}^{-1}$)

处理	土层	苗期	拔节期	大喇叭口期	收获期
CK	0~20 cm	1.495±0.013a	1.508±0.013a	1.513±0.010a	1.484±0.018a
	20~40 cm	1.507±0.021a	1.515±0.012a	1.523±0.005a	1.499±0.018a
SS	0~20 cm	1.299±0.015b	1.310±0.008b	1.324±0.013b	1.312±0.010c
	20~40 cm	1.309±0.015b	1.315±0.008b	1.335±0.010b	1.324±0.010c
SW	0~20 cm	1.294±0.010b	1.309±0.005b	1.330±0.008b	1.380±0.012b
	20~40 cm	1.302±0.010b	1.314±0.013b	1.337±0.025b	1.397±0.019b
G	0~20 cm	1.304±0.026b	1.312±0.003b	1.337±0.008b	1.392±0.020b
	20~40 cm	1.310±0.017b	1.322±0.010b	1.342±0.024b	1.422±0.013b
P	0~20 cm	1.297±0.015b	1.302±0.013b	1.320±0.010b	1.302±0.016c
	20~40 cm	1.307±0.010b	1.312±0.012b	1.332±0.025b	1.314±0.013c

表 4 不同地膜覆盖后的硝酸还原酶活性变化($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$)
Table 4 Changes of soil nitrate reductase activity after plastic mulching ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$)

处理	土层	苗期	拔节期	大喇叭口期	收获期
CK	0~20 cm	0.002 4±0.000 2c	0.002 2±0.000 1c	0.001 7±0.000 2a	0.003 5±0.000 4c
	20~40 cm	0.001 5±0.000 1c	0.001 3±0.000 1b	0.001 2±0.000 4a	0.003 0±0.000 1a
SS	0~20 cm	0.004 1±0.000 2a	0.003 0±0.000 4b	0.001 9±0.000 2a	0.005 9±0.001 0a
	20~40 cm	0.002 8±0.000 3a	0.002 0±0.000 4a	0.001 4±0.000 2a	0.003 7±0.000 8a
SW	0~20 cm	0.004 5±0.000 1a	0.003 8±0.000 2a	0.002 1±0.000 1a	0.005 0±0.000 4ab
	20~40 cm	0.002 9±0.000 0a	0.001 0±0.000 5ab	0.001 6±0.000 1a	0.003 4±0.000 2a
G	0~20 cm	0.003 1±0.000 4b	0.002 4±0.000 4c	0.001 7±0.000 4a	0.004 4±0.000 3b
	20~40 cm	0.002 2±0.000 1b	0.002 0±0.000 1ab	0.001 3±0.000 1a	0.003 0±0.000 4a
P	0~20 cm	0.003 5±0.000 1b	0.003 1±0.000 2b	0.001 8±0.000 3a	0.005 0±0.000 3ab
	20~40 cm	0.002 5±0.000 1b	0.002 0±0.000 4ab	0.001 3±0.000 6a	0.003 1±0.001 0a

表 5 不同地膜覆盖后的亚硝酸还原酶活性变化($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$)
Table 5 Changes of soil nitrite reductase activity after plastic mulching($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$)

处理	土层	苗期	拔节期	大喇叭口期	收获期
CK	0~20 cm	0.109±0.000 6a	0.103±0.001 1a	0.098±0.005 6a	0.107±0.003 4a
	20~40 cm	0.096±0.000 5d	0.102±0.000 5a	0.103±0.002 0a	0.105±0.001 6a
SS	0~20 cm	0.108±0.000 9b	0.099±0.000 6b	0.092±0.001 6a	0.106±0.000 4a
	20~40 cm	0.105±0.000 6a	0.096±0.000 4d	0.093±0.005 8b	0.105±0.000 3a
SW	0~20 cm	0.106±0.000 3c	0.097±0.000 9c	0.092±0.000 8a	0.104±0.001 5ab
	20~40 cm	0.103±0.000 8b	0.096±0.000 8cd	0.093±0.002 7b	0.102±0.000 9b
G	0~20 cm	0.108±0.000 4b	0.100±0.000 5b	0.095±0.003 0a	0.101±0.002 4b
	20~40 cm	0.102±0.000 4b	0.098±0.000 4b	0.095±0.002 2b	0.106±0.000 4a
P	0~20 cm	0.106±0.000 4c	0.098±0.001 0bc	0.092±0.005 1a	0.105±0.000 9ab
	20~40 cm	0.101±0.000 6c	0.097±0.001 2bc	0.093±0.000 7b	0.105±0.000 7a

种覆膜处理的亚硝酸还原酶活性均低于 CK，但降幅较小,SS、SW、G 和 P 处理在苗期 0~20 cm 处较 CK 的降幅分别为 0.92%、2.8%、0.92%和 2.8%;在拔节期的降幅分别是 3.9%、5.8%、2.9%和 4.9%。总体来说,几种处理之间的亚硝酸还原酶活性在苗期和拔节期的差异相对较大，说明前期覆膜下的玉米生长旺盛,对土壤亚硝酸还原酶活性的影响较大。

2.6 土壤酶活性与土壤水热状况及玉米产量的相关性

不同地膜覆盖各生育期土壤温度、水分含量、呼吸率及玉米产量变化见表 6,并对其与酶活性进行相关性分析,得到不同酶活性与水热、产量的相关系数,见表 7。从表 7 中可以看出,土壤脲酶和亚硝酸还原酶表现为与土壤水分含量显著正相关($P<0.05$),过氧化氢酶与水分含量极显著正相关($P<0.01$),3 种酶活性与产量呈显著负相关,与土温则无明显相关性。碱性磷酸酶和硝酸还原酶与玉米产量极显著正相关($P<0.01$),除亚硝酸还原酶外,其他 4 种酶活性均与

土壤呼吸率呈极显著的正相关性($P<0.01$)。事实上,除了水热及产量外,施肥状况和玉米根系生长等也直接或间接地影响酶活性大小。

3 讨论

地膜覆盖通过改变地表辐射和减少土壤水分蒸发改善田间小气候，土壤的水热变化呈现特殊的规律^[9]。土壤酶活性的大小与土壤水热条件、土壤空气的通透性、作物生长发育以及肥料使用等状况密切相关。汪景宽等^[6]、Liu 等^[17]、Sun 等^[18]认为,地膜覆盖使得土壤脲酶和过氧化氢酶活性降低,而土壤碱性磷酸酶和蔗糖酶活性则有所升高，这与本文研究结果一致。本文试验结果还表明,覆膜使得土壤亚硝酸还原酶活性有所降低,而硝酸还原酶活性则有所上升。土壤脲酶和过氧化氢酶的降低可能是因为覆膜之后的土壤含水量增加,且玉米生长旺盛,导致玉米根系及土壤呼吸加剧,CO₂ 分压增高，土壤氧化还原电位下

表 6 不同地膜覆盖各生育期土壤温度、贮水量、呼吸率及玉米产量变化

Table 6 Changes of soil temperature, water storage, soil respiration and maize yield at different growth stages with different mulching

项目	生育期	SS	G	SW	P	CK
土壤温度/℃	苗期	32.3	33.1	31.5	34.3	28.4
	拔节期	35.6	34.7	33.3	38.6	36.7
	大喇叭口期	24.9	25.4	23.0	27.3	29.9
	收获期	24.1	23.1	20.1	24.1	24.9
土壤贮水量/mm	苗期	152.6±0.5b	164.9±0.2d	166.6±0.3e	161.6±0.3c	144.8±0.2a
	拔节期	106.1±2.5a	111.0±0.2bc	114.0±0.6cd	115.7±0.6d	109.0±0.4ab
	大喇叭口期	150.3±0.5d	148.6±0.4c	151.8±0.5e	140.3±0.4b	129.8±0.2a
	收获期	156.2±0.5c	142±0.8ab	144.5±0.4b	139.6±2.1a	142±0.6ab
土壤呼吸率/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	苗期	2.43±0.61c	2.62±0.59b	2.41±0.72c	2.41±0.81c	2.93±0.47a
	拔节期	3.25±0.19c	3.48±0.36b	3.39±0.93b	3.18±0.82c	3.71±0.66a
	大喇叭口期	3.90±0.47bc	4.13±0.09b	4.11±0.82b	3.79±0.57c	4.56±1.02a
	收获期	3.26±0.55c	3.52±0.91b	3.52±1.02b	3.19±0.84c	3.77±0.58a
玉米产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$		11 350.8±74.9b	10 628.2±231.3c	12 224.6±214.7a	10 459.1±146.6c	7 943.7±126.7d

注:土壤温度使用 0~25 cm 土层膜下的平均温度;土壤贮水量是 0~60 cm 总贮水量;玉米产量为玉米收获后各小区收获的实际玉米穗数,之后称重折算各处理玉米产量;不同字母表示同行同生育期处理间差异显著($P<0.05$)。

表 7 土壤酶活性和土壤水热、土壤呼吸率及玉米产量的相关系数

Table 7 Correlation coefficients of soil enzyme activity and soil water, heat and corn production

相关性	脲酶	碱性磷酸酶	过氧化氢酶	硝酸还原酶	亚硝酸还原酶
土壤温度	0.139 5	0.342 6*	0.173 1	0.120 4	0.239 6*
土壤贮水量	0.140 2*	0.012 6	0.548 6**	0.371 8*	0.312 9*
土壤呼吸率	0.427 0**	0.591 1**	0.445 2**	0.496 7**	0.312 4*
玉米产量	-0.340*	0.706**	-0.376*	0.794**	-0.293*

注:* 表示在 $P<0.05$ 水平上显著;** 表示在 $P<0.01$ 水平上显著。

降,特别是覆膜之后的土壤 pH 值下降,从而抑制了脲酶和过氧化氢酶活性^[6]。土壤碱性磷酸酶和硝酸还原酶活性的升高可能是因为覆膜之后的土壤氮磷含量和利用率有所提高^[6],作物生长较快,根系的呼吸强度大。结合我们所得到的土壤水热及玉米生产等数据分析,土壤酶活性的变化与水热动态变化、作物生长情况以及地膜降解情况都呈现出显著的相关性。

从玉米生长的整个生育期来看,土壤碱性磷酸酶和硝酸还原酶活性随玉米生育期的推进呈不断升高的趋势;脲酶和过氧化氢酶则在大喇叭口期达到峰值,收获期为最低值,亚硝酸还原酶则在苗期活性最高。不同的酶种在不同环境条件下受到的影响因素不同。苗期阶段,刚施肥的土壤中底物充足,土温高,覆膜之后的土表蒸发减少,湿度大而空气通透性较差,土壤呼吸率较低,土壤脲酶和过氧化氢酶活性大小表现为 $\text{CK}>\text{G}\geq\text{P}>\text{SS}\geq\text{SW}$,4 种覆膜处理之间的差异较小,其中,光降解地膜 G 处理的透光性强,幼苗的光合速率较高,脲酶活性最高;生物降解地膜 SW 处理

的厚度最大,淀粉添加剂使得地膜呈现奶白色,透光性差,土壤呼吸率最低,玉米幼苗的根系呼吸慢,土壤脲酶和过氧化氢酶活性最低。至拔节期和大喇叭口期,覆膜后的作物生长旺盛,作物根系和土壤的呼吸率升高,而 G 和 SW 处理则随着时间的推移逐渐裂解,保温保墒性能降低,酶活性也有所不同。这一时期的土壤碱性磷酸酶活性大小表现为 $\text{SS}>\text{SW}>\text{P}>\text{G}>\text{CK}$,硝酸还原酶活性 $\text{SW}>\text{SS}>\text{P}\geq\text{G}>\text{CK}$ 。渗水地膜的微通透结构使得其覆盖下的土壤水热气供需相对平衡,且玉米生长旺盛,根系呼吸强度大;生物降解地膜此时裂解,土壤呼吸率升高,作物生长旺盛对 2 种酶活性的增加做出较大贡献。收获期的土壤酶活性受到多种因素的综合影响,处理之间的酶活性无明显变化规律。到收获期,秋雨来临,土壤含水量增加而空气通透性下降,SS 和 SW 处理的玉米产量和生物量最高,受作物根系呼吸影响大,G 和 SW 处理完全降解,土壤呼吸率有所提高,而 P 和 SS 处理的压实度最高,土壤呼吸率最低。多种因素的综合影响使得土壤酶活性差

异在收获期有所不同。从相关性分析可知,土壤呼吸率和玉米产量是影响酶活性最大的两种因素。

从土层深度来讲,除过氧化氢酶在20~40 cm处的活性值稍高于0~20 cm外,其他几种酶都表现为0~20 cm处的活性高于20~40 cm,具有表聚性,尤以脲酶和碱性磷酸酶随土层加深的降速更快($P<0.05$)。这是因为:(1)表层土壤直接接触空气,土壤结构疏松,土壤空气的通透性良好;(2)土表直接接受太阳辐射,土壤温度较高;(3)表层土壤的有机质含量高,土壤生物活动频繁、活跃,分泌的催化剂酶类多;而底层受土壤熟化度及营养元素状况的影响,只有较少的可利用碳导致有少量的微生物种群、较低的新陈代谢率;(4)表层施肥,底物充足,很多专性水解酶含量远远大于底层土壤;(5)20~40 cm处的土壤过氧化氢酶活性稍高于0~20 cm,可能是由于土壤结构紧密,土壤空气通透性差,氧化还原的环境下包含的底物过氧化氢较充足。

4 结论

推广使用可降解类型地膜是当前解决残膜污染的一个有效途径,也是当前学术研究的热门话题。在山西省进行了渗水地膜(SS)、光降解地膜(G)、生物降解地膜(SW)、普通地膜(P)和未覆膜对照(CK)的对比试验,对4种地膜5种酶活性测定,并结合土壤水热状况进行比较后,得出以下结论:

(1)与CK相比,覆膜后的SS、SW、P和G处理在0~20 cm处与20~40 cm处均可显著增加土壤中的碱性磷酸酶、硝酸还原酶活性,而降低土壤脲酶和过氧化氢酶活性。与G和P处理相比,SS和SW处理碱性磷酸酶和硝酸还原酶的增幅较大,脲酶和过氧化氢酶的降幅较小,整体上有利于土壤微环境的发展。

(2)综合土壤水热与玉米生长及地膜降解情况等分析发现,在山西半干旱地区进行不同类型地膜覆盖试验,SW和SS处理为最佳的覆盖方式,尤其是生物可降解地膜的土壤酶活性性能优于其他地膜,作为一种新型环保材料,生物质可降解类型地膜可以替代普通地膜,未来应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 康慧玲,刘淑英,王平,等.覆膜和灌溉对小麦秸秆还田土壤酶活性的影响[J].干旱区资源与环境,2017,31(5):163-167.
- KANG Hui-ling, LIU Shu-ying, WANG Ping, et al. Effect of plastic mulching and irrigation on soil enzyme activity of wheat straw returning [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(5):

- 163-167.
- [2] 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[J].生态学报,2005,25(6):1312-1317.
- YANG Qing-hua, HAN Jin-feng, HE De-xian. Effects of liquid film mulching on soil microorganism and enzyme activity in cotton field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6):1312-1317.
- [3] 岳中辉,张兴义,隋跃宇,等.黑土酶活性的剖面分布及其对养分的评估[J].水土保持学报,2011,25(4):154-164.
- YUE Zhong-hui, ZHANG Xing-yi, SUI Yue-yu, et al. Profile distribution of enzymatic activities of black soil and evaluation of nutrients[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4):154-164.
- [4] 关松荫,等.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- GUAN Song-yin, et al. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [5] 姚建民,殷海善.渗水地膜与旱地农业[J].自然资源学报,1998,10(4):25-28.
- YAO Jian-min, YIN Hai-shan. Water seepage film and dryland agriculture[J]. *Journal of Natural Resources*, 1998, 10(4):25-28.
- [6] 孙露莹.玉米不同种植模式对土壤酶活性及微生物量碳氮的影响[D].北京:中国科学院,2015.
- SUN Lu-ying. Effects of different maize planting patterns on soil enzyme activities and microbial biomass carbon and nitrogen[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [7] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等.长期定位施肥田土壤酶活性的动态变化特征[J].生态环境,2008,17(5):2059-2063.
- SUN Rui-lian, ZHAO Bing-qiang, ZHU Lu-sheng, et al. Dynamic changes of soil enzyme activities in long-term fertilization field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 17(5):2059-2063.
- [8] 贾伟.长期施肥对褐土土壤微生物及酶活性变化规律影响的研究[D].太原:山西大学,2008.
- JIA Wei. Effects of long-term fertilization on changes of soil microorganisms and enzyme activities in cinnamon soil[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2008.
- [9] 史建国,刘景晖,史君卿,等.地膜再利用对向日葵田土壤过氧化氢酶活性的影响[J].内蒙古农业大学学报,2015,36(5):17-20.
- SHI Jian-guo, LIU Jing-hui, SHI Jun-qing, et al. Effects of plastic film reuse on soil catalase activity in sunflower field[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2015, 36(5):17-20.
- [10] 李志建,倪恒,周爱国,等.额济纳旗盆地土壤过氧化氢酶活性的垂向变化研究[J].干旱区资源与环境,2004,18(1):86-89.
- LI Zhi-jian, NI Heng, ZHOU Ai-guo, et al. Vertical variation of soil catalase activity in Ejinaqi Basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004, 18(1):86-89.
- [11] 马堃,李橙,肖凡,等.怀涿葡萄产区土壤过氧化氢酶活性空间分布规律及影响因素分析[J].中国生态农业学报,2013,21(8):992-997.
- MA Kun, LI Cheng, XIAO Fan, et al. Spatial distribution and influencing factors of soil catalase activity in Huaiyu grape production area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(8):992-997.
- [12] 安宁宁,范伟国,谭秋平,等.不同配比土壤对平邑甜茶苗木生长和土壤微生物及土壤硝酸还原酶的影响[J].应用与环境生物学报,

- 2012, 18(6):1022-1026.
- AN Ning-ning, FAN Wei-guo, TAN Qiu-ping, et al. Effects of different cultivating media on growth of *Malus hupehensis* seedlings, microorganism and nitrate reductase in soil[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2012, 18(6):1022-1026.
- [13] 武志杰, 孙志梅, 张丽莉, 等. 一种检测土壤亚硝酸还原酶活性的分析方法:200510047888.5[P]. 2007-06-13.
- WU Zhi-jie, SUN Zhi-mei, ZHANG Li-li, et al. Analytical method for detecting nitrite reductase activity in soil: 200510047888.5[P]. 2007-06-13.
- [14] 闫钟清, 齐玉春, 彭 琴, 等. 降水和氮沉降增加对草地土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(9):1-9.
- YAN Zhong-qing, QI Yu-chun, PENG Qin, et al. Effects of precipitation and increased nitrogen deposition on soil enzyme activities in grassland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(9):1-9.
- [15] 李春霞, 陈 阜, 王俊忠, 等. 秸秆还田与耕作方式对土壤酶活性动态变化的影响[J]. 河南农业科学, 2006, 11(3):68-70.
- LI Chun-xia, CHEN Fu, WANG Jun-zhong, et al. Effects of returning straw and tillage methods on dynamic changes of soil enzyme activities[J]. *Henan Agricultural Science*, 2006, 11(3):68-70.
- [16] 汪景宽, 彭 涛, 张旭东, 等. 地膜覆盖对土壤主要酶活性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 1997(3):210-213.
- WANG Jing-kuan, PENG Tao, ZHANG Xu-dong, et al. Effects of plastic film mulching on main soil enzyme activity[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1997(3):210-213.
- [17] Liu Y R, Li X, Shen Q R, et al. Enzyme activity in water-stable soil aggregates as affected by long-term application of organic manure and chemical fertiliser[J]. *Pedosphere*, 2013(1):151-160.
- [18] Sun X, Gao C, Guo L D. Changes in soil microbial community and enzyme activity along an exotic plant *Eupatorium adenophorum* invasion in a Chinese secondary forest[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(33):101-118.
- [19] Sanchez-Hernandez J C, Sandoval M, Pierart A. Short-term response of soil enzyme activities in a chlorpyrifos-treated mesocosm: Use of enzyme-based indexes[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 73:525-535.
- [20] Ma Y H, Fu S L, Zhang X P, etc. Intercropping improves soil nutrient availability, soil enzyme activity and tea quantity and quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 119(4):171-178.
- [21] Zheng L D, Zhang M X, Xiao R, et al. Impact of salinity and Pb on enzyme activities of a saline soil from the Yellow River Delta: A microcosm study[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2016, 10:601-609.
- [22] 孙梦媛, 刘景辉, 杨彦明, 等. 全膜垄作栽培对旱作马铃薯产量及土壤水热和酶活性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2018(1):1022-1030.
- SUN Meng-yuan, LIU Jing-hui, YANG Yan-ming, et al. Effect of cultivation with full-membrane ridge on potato yield, soil water and heat and enzyme activity in dryland[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018(1):1022-1030.
- [23] 陆海飞, 郑金伟, 余喜初, 等. 长期无机有机肥配施对红壤性水稻土微生物群落多样性及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3):576-584.
- LU Hai-fei, ZHENG Jin-wei, YU Xi-chu, et al. Effects of long-term inorganic-organic fertilizers application on microbial community diversity and enzyme activity in reddish paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(3):576-584.
- [24] 吴宏亮, 许 强, 陈 阜, 等. 不同覆盖措施对旱区农田土壤酶活性及西瓜产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014(3):173-178.
- WU Hong-liang, XU Qiang, CHEN Fu, et al. Effects of different covering measures on soil enzyme activities and yield of watermelon in arid regions[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014(3):173-178.
- [25] 孙佳瑞. 不同耕作措施对黄土高原旱作农田土壤微生物及酶活性的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2015.
- SUN Jia-rui. Effects of different tillage measures on soil microorganism and enzyme activities of farmland in Loess Plateau[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2015.
- [26] 武美燕. 连续覆膜旱作稻田土壤肥力及水稻营养特性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2008.
- WU Mei-yan. Study on soil fertility and rice nutrient characters of continuously covered rice fields[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [27] 王 杰, 李 刚, 修伟明, 等. 氮素和水分对贝加尔针茅草原土壤酶活性和微生物量碳氮的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(3):237-245.
- WANG Jie, LI Gang, XIU Wei-ming, et al. Effects of nitrogen and water on soil enzyme activity and soil microbial biomass in *Stipa baicalensis* steppe, Inner Mongolia of North China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(3):237-245.