

旱地玉米不同耕作覆盖措施的土壤环境及产量效应

张冬梅* 张伟 姜春霞 王晓娟 刘化涛 杨柯 闫六英 刘恩科 翟广谦

(山西省农业科学院 旱地农业研究中心,太原 030031)

摘要 为解决冷凉区旱地玉米生产中存在的干旱缺水、低温冷凉和土壤肥力下降等问题,于2011—2014年采用裂区设计,在山西省旱作节水农业示范基地——阳曲县河村,设置4种不同耕作覆盖处理,研究旱地玉米不同耕作覆盖处理的土壤水、肥、热及产量效应,结果表明:1)秋深耕+秸秆还田较春旋耕+无秸秆还田明显提高苗期5 cm日平均地温和日最低平均地温,3年平均分别提高1.1和1.3℃。覆膜处理3年平均较不覆膜处理增加苗期5 cm日平均地温和日最低平均地温1.7和1.2℃;2)秋深耕+秸秆还田苗期0~10 cm土壤含水量较春旋耕+无秸秆还田平均增加1.9个百分点。3)玉米苗期秋深耕+秸秆还田0~12.5 cm土壤紧实度平均为春旋耕+无秸秆还田的3.0倍,从15.0 cm开始2个处理土壤紧实度基本一致。4)连续3年耕作覆盖处理后,秋深耕+秸秆还田土壤肥力明显得到改善,其中0~20 cm土壤有机质含量、土壤全磷和全钾都较春旋耕+无秸秆还田有显著($P<0.01$)增加,增幅分别为5.8%、6.4%和6.1%,覆膜土壤全氮含量显著高于不覆膜,增幅为8.6%。5)秋深耕+秸秆还田有显著($P<0.01$)增产作用,4年平均增加经济产量12.2%,4年覆膜处理较不覆膜处理经济产量平均增加25.3%。所有处理中,秋深耕+秸秆还田+覆膜产量最高。6)覆膜处理中,秋深耕+秸秆还田WUE平均较春旋耕+无秸秆还田增加5.4%;而不覆膜处理中,秋深耕+秸秆还田WUE平均较春旋耕+无秸秆还田增加12.0%。因此,目前适宜该区域的蓄水保墒、增温稳温、培肥地力和高产高效的土壤耕作覆盖措施为秋深耕+秸秆还田+覆膜。

关键词 玉米;旱地;耕作覆盖;土壤环境;产量

中图分类号 S341.1;S152.7

文章编号 1007-4333(2019)06-0026-12

文献标志码 A

Effects of different tillage and mulch treatments on the soil environment and yield of dryland maize

ZHANG Dongmei*, ZHANG Wei, JIANG Chunxia, WANG Xiaojuan, LIU Huatao,
YANG Ke, YAN Liuying, LIU Enke, ZHAI Guangqian

(Dryland Agriculture Research Center, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China)

Abstract In order to solve the problems of drought and water shortage, low temperature and cold, soil fertility decline and so on in dryland maize production in cold climate areas, the split plot design was adopted in 2011–2014. In the demonstration base of dry farming and water saving agriculture in He village, Yangqu County, Shanxi Province, the effects of different tillage and mulch treatments on soil water, fertilizer, heat and yield of dryland maize with 4 different tillage mulching treatments were studied. The results showed that: 1) Deep tillage in autumn plus straw returning (DTS) obviously increased the 5 cm ground temperature at seedling stage compared with rotary tillage in spring with no straw returning (RTN). The average daily ground temperature and average daily minimum ground temperature increased by 1.1 and 1.3 °C over 3 years, respectively. Plastic film mulching (PM) for 3 years improved the 5 cm at seedling stage compared with no plastic film mulching (NPM). The average daily ground temperature and average daily minimum

收稿日期: 2018-05-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300305-2);省科技攻关计划项目(201703D221001-5);国家公益性行业(农业)科研专项(201503124);院攻关项目(YCX2017D2401、YGG1639)

第一作者: 张冬梅,副研究员,主要从事旱作栽培技术研究,E-mail:13803401159@163.com

ground temperature increased by 1.7 and 1.2 °C, respectively. 2) Compared with RTN, the soil moisture content of DTS at seeding stage in 0–10 cm increased by 1.9 percentage point. 3) The soil compactness of DTS at seeding stage in 0–12.5 cm was equally 3 times of RTN. The soil compactness of the two treatments was basically the same from 15 cm. 4) After 3 years of continuous tillage and mulching treatment, the soil fertility of DTS was obviously improved. The content of soil organic matter, total phosphorus and potassium in 0–20 cm were significantly higher than that in RTN ($P < 0.01$), and the increases were respectively 5.8%, 6.4% and 6.1%. Total nitrogen content in PM was significantly higher than that in NPM with an increase of 8.6%. 5) DTS increased the yield significantly ($P < 0.01$), and the economic yield increased by 12.2% on average in 4 years. The economic yield of PM in 4 years increased 25.3% compared with NPM equally. Among all the treatments, the yield of DTS plus PM was the highest. 6) In PM treatment, the WUE of DTS increased by 5.4% compared with that of RTN. And in NPM treatment, the WUE of DTS increased by 12.0% compared with that of RTN. In conclusion, DTS plus PM is appropriate for the area to store water and preserve soil moisture, increase and stabilize temperature, improve soil fertility, and get high yield and high efficiency currently.

Keywords maize; dryland; tillage and mulch; soil environment; yield

玉米是山西省的第一大粮食作物,总产量占山西省粮食总产的 70% 以上,在山西省粮食生产和国民经济中占有举足轻重的位置。该区属半干旱半湿润大陆性季风气候,十年九旱,常年春旱,年均降水为 370~560 mm,70% 的降水主要集中在 7—9 月份,降水总量偏少且分布不均,导致春旱接连夏旱和秋旱,加上多年的土壤浅耕和焚烧作物秸秆,不仅污染环境,浪费资源,还造成土壤紧实、耕层变浅和土壤肥力降低,严重影响该区旱地玉米的可持续稳产高产。此外,低温冷凉、积温不足也是限制该区旱地玉米生产的主要因素,地膜覆盖是该区域多年来的增温保墒增产的主要栽培技术之一^[1-2]。深耕可有效缓解土壤紧实,增加土壤通透性,提高土壤蓄水能力和作物水分利用效率^[3-7]。此外,秸秆粉碎还田能够培肥地力,降低土壤容重,提高土壤水分含量,提高资源利用率和水分利用效率^[8-10]。土壤耕作与秸秆还田配合应用不仅能够改善土壤理化性状,而且可以提高作物产量和水分利用效率^[10-12]。前人研究多侧重单一的土壤耕作方式、秸秆处理方式或耕作与秸秆还田相结合对土壤环境和产量的影响,研究周期相对较短。针对深耕和秸秆粉碎还田相结合并与当地主要栽培技术—地膜覆盖二者交互对较长周期内土壤水肥热及玉米产量效应的研究鲜有报道。本研究采用土壤耕作处理(耕作方式+秸秆处理方式)与地膜覆盖相结合的模式,分析耕作处理、地膜覆盖及二者交互对土壤理化性状及玉米产量变化的影响,以期明确适合该区域的蓄水保墒、增温稳温、培肥地力和稳产高效土壤耕作覆盖措施,为冷凉区旱地玉米可持续增产提供理论和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验于 2011—2014 年在山西省旱作节水农业示范基地——阳曲县河村进行。该区位于山西省中部,属典型的半干旱区,海拔 1 270 m,无霜期 120 d 左右,年平均降水量 450 mm,年均蒸发量 1 995 mm,年平均气温 6~7 °C,昼夜温差大,≥10 °C 活动积温约 2 600 °C,属玉米早熟区。土壤为黄土质淡褐土,2010 年秋收后试验地耕层土壤有机质含量为 11.4 g/kg,全氮、全磷、全钾含量分别为 1.13, 0.81, 22.8 g/kg,碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 78.4, 5.78, 167.0 mg/kg,基本属于中等肥力。2011—2014 年及多年平均玉米生育期 5—9 月份的降水及 0~2 m 的底墒情况见表 1。试验开始实施前,试验地连续多年种春玉米,未实施秸秆还田,并长期进行春播前土壤旋耕,然后常规覆膜播种。

1.2 试验方法

试验采用裂区设计,主区为耕作处理,秋深耕+秸秆还田(Deep tillage in autumn, straw returning, DTS)和春旋耕+无秸秆还田(Rotary tillage in spring, no straw returning, RTN)2 个水平,裂区为覆膜(Plastic film mulching, PM)和不覆膜(No plastic film mulching, NPM)2 个水平。试验共设 4 个处理,3 次重复,共 12 个小区,小区面积为 4.8 m×13.0 m=62.4 m²。具体处理为:秋深耕+秸秆还田+覆膜(DTS+PM)、秋深耕+秸秆还田+不覆膜(DTS+NPM)、春旋耕+无秸秆还田+覆膜(RTN+PM)、春旋耕+无秸秆还田+不覆膜(RTN+NPM)。

表1 2011—2014年0~2 m底墒、玉米生育期降水及与1960—2005年多年平均降水的比较

Table 1 0—2 m base soil moisture and precipitation distribution in growth of corn of 2011—2014 year, the comparison of precipitation distribution of multi-years (1965—2005) and 2011—2014 year mm

年份 Year	月份 Month						降水 年型 Precipitation year	底墒(0~2 m 土壤贮水量) Base soil moisture (0—2 m soil water storage)	干旱情况 Drought condition
	5	6	7	8	9	5—9			
2011	44.3 (11.1)	65.2 (8.2)	154.5 (51.6)	88.0 (-15.7)	93.1 (30.9)	445.1 (86.1)	丰水年	365.1(一般)	生育期基本未受旱
2012	23.2 (-10.0)	79.9 (22.9)	175.4 (72.5)	42.1 (-61.6)	72.4 (10.2)	393.0 (34.0)	偏丰年	408.0(很好)	灌浆期受旱
2013	28.5 (-4.7)	99.3 (42.3)	177.9 (75.0)	33.8 (-69.9)	105.5 (43.3)	445.0 (86.0)	丰水年	385.7(好)	灌浆期受旱
2014	40.0 (6.8)	32.4 (-24.6)	79.8 (-23.1)	47.8 (-55.9)	78.4 (16.2)	278.4 (-80.6)	干旱年	393.9(较好)	拔节抽雄灌浆期受旱
多年平均 Annual average	33.2	57.0	102.9	103.7	62.2	359.0	—	—	

注:括号中的数值为较多年(1960—2005)平均的增加值。

Note: In bracket the figure is excess over the average of multi-years from 1960 to 2005.

各试验处理的小区位置和面积固定,连年进行相应的土壤耕作、秸秆还田和覆膜处理。秋深耕+秸秆还田在上一年作物秋收后进行,秋深耕采用铧式犁翻耕1遍,作业深度为25 cm,随后旋耕机浅旋镇压,浅旋深度为8~10 cm,秸秆还田为上茬玉米收获后,采用秸秆粉碎机将秸秆全部粉碎成<10 cm的小段,结合土壤耕作全部翻埋还田;春旋耕+无秸秆还田在常规播期前进行,旋耕深度约为15 cm,秸秆不还田处理则在上一年作物秋收后,将玉米秸秆全部移出试验地。覆膜处理在播前进行微垄覆膜,膜宽100 cm,起垄高度为5~8 cm,垄侧膜下播种。所有处理在同一时期进行等行距60 cm点播,每穴2粒种子。

为合理应用不同处理光热资源,覆膜处理供试品种为‘kx9384’,不覆膜处理供试品种为‘德美亚1号’。种植密度为75 000株/hm²,2011—2014年播期分别为4月28日、4月29日、4月26日和4月23日,每年在早霜后择期收获,2011—2014年早霜分别为9月18日、9月28日、9月25日和10月11日。

所有处理采用播种施肥器同时进行播种和施肥,肥料种类为硝酸磷肥(N:P₂O₅:K₂O质量比为26.5:11.5:0),施用量为900 kg/hm²,一次性全部施入。6年试验全部在自然降水条件下进行,无补充灌溉,按照常规措施进行田间中耕管理。

1.3 研究方法

1.3.1 降雨量

气象站自动记录试验年份生育期内每次降水量,同时查阅该区多年平均降水。

1.3.2 土壤水分及水分利用效率

0~10 cm土壤含水量:2011年4月29日用烘干法测定;2012年于5月2日、5月7日、5月18日、5月30日用烘干法测定;2013年于5月10日、5月16日、5月22日和5月27日用TDR法测定。

每小区中部各埋设1根中子管,深度200 cm。从玉米播种到收获,定期用CPN-503中子仪(20~200 cm)和6050X1Trase系统(0~20 cm)测定土壤含水量,中子仪每隔20 cm为一层测定土壤水分。土壤水分贮存量 $H=v \times h$ 。式中: v 为土壤体积含

水量,%; h 为土层厚度,mm。

玉米生育期耗水量,mm=播前土壤贮水量+生育期降水量-收获后土壤贮水量;水分利用率WUE,kg/(hm²·mm)=玉米产量/生育期耗水量。

1.3.3 土壤温度

在地温较低的玉米苗期用U盘式土壤温度记录仪测定土壤温度变化较大的5cm土壤温度,观测时间为2011年5月1—24日、2012年5月3—31日、2013年5月1—26日,测定位置为每个处理播种行,每小时记录1个数据。

1.3.4 土壤养分

连续处理3年后,于2013年10月2日采集0~20cm土样,测定有机质含量、全氮、全磷和全钾含量。

1.3.5 土壤紧实度

于2013年5月24日利用SC-900土壤紧实度仪(Spectrum Technologies Ins, USA)对不同处理的土壤紧实度进行测定。土壤紧实度仪放在播种行,垂直向下按压,随着土壤深度的变化紧实度仪自动计数,每2.5cm记录1次,测定深度为0~45cm。

1.3.6 考种及测产

早霜后择期按小区实际测定各处理经济产量(折算成籽粒含水量为14%)。每小区连续取样20株,进行室内考种,测定穗长、穗粗、穗行数和行粒数

等穗部性状以及百粒重等产量构成因子等指标,并计算收获指数。收获指数(HI)=20穗籽粒重/20株地上干物质重×100%。生物产量按照20株地上部干物质重折算,kg/hm²。

1.4 统计方法

用Excel进行试验数据处理,用DPS统计软件,进行试验数据的方差分析

2 结果与分析

2.1 不同耕作覆盖处理对旱地玉米苗期土壤温度的影响

由表2和表3可知,秋深耕+秸秆还田较春旋耕+无秸秆还田明显提高玉米苗期土壤表层5cm日平均地温和日最低平均地温,3年平均分别提高1.1和1.3℃。其中由于上一年秸秆还田量、特别是上一年秋天耕作后至第二年播种之前降水量不同,造成当年玉米苗期土壤物理结构不同,因此不同年份地温增加幅度不同。2011年秋深耕+秸秆还田生物量较大,且2011—2012年休闲期降水较多年平均多38.2mm,增加53.6%,因此,2012年秋深耕+秸秆还田在玉米苗期土壤增温效应明显,土壤表层5cm日平均地温和日最低平均地温分别较春旋耕+无秸秆还田提高1.7和2.8℃。地膜覆盖改善土壤热量的作用显著,覆膜处理3年平均较不覆膜处理增加苗期土壤表层5cm日平均地温和日最

表2 不同耕作覆盖处理玉米苗期土壤表层5cm日平均地温

Table 2 Average daily soil temperature of 5 cm topsoil at maize seedling stage under different tillage and mulch treatments

主区处理 Main plot treatment	裂区处理 Split plot treatment	时间 Time		
		2011-05-01—24	2012-05-03—31	2013-05-01—26
秋深耕+秸秆还田 DTS	覆膜 PM	15.9 aA	21.4 aA	21.3 aA
	不覆膜 NPM	13.8 bB	20.6 aA	18.4 bB
	平均值 Average	14.9 aA	21.0 aA	19.9 aA
春旋耕+无秸秆还田 RTN	覆膜 PM	15.0 aA	19.6 aA	20.0 aA
	不覆膜 NPM	13.3 bB	19.0 aA	18.2 bB
	平均值 Average	14.2 aA	19.3 bA	19.1 aA
(秋深耕+秸秆还田)-(春旋耕+无秸秆还田) DTS-RTN		0.7	1.7	0.8
覆膜-不覆膜 PM-NPM		1.9	0.7	2.4

注:同列中不同小写字母表示差异达显著水平($P<0.05$),不同大写字母表示差异达极显著水平($P<0.01$)。下同。

Note: Different capital letters within the same column mean significant differences at 0.01 level and different lowercase letters mean significant differences at 0.05 level. The same below.

表3 不同耕作覆盖处理玉米苗期土壤表层5 cm日最低平均地温

Table 3 Average daily lowest soil temperature of 5 cm topsoil at maize seedling stage under different tillage and mulch treatments

主区处理 Main plot treatment	裂区处理 Split plot treatment	日期 Date		
		2011-05-01—24	2012-05-03—31	2013-05-01—26
秋深耕+秸秆还田 DTS	覆膜 PM	8.6 aA	15.0 aA	13.8 aA
	不覆膜 NPM	7.9 bA	14.3 aA	12.6 bA
	平均值 Average	8.3 aA	14.7 aA	13.2 aA
春旋耕+无秸秆还田 RTN	覆膜 PM	8.5 aA	12.8 aA	13.3 aA
	不覆膜 NPM	6.6 bB	10.9 bB	12.3 bA
	平均值 Average	7.6 bA	11.9 bB	12.8 aA
(秋深耕+秸秆还田)-(春旋耕+无秸秆还田) DTS-RTN		0.7	2.8	0.4
覆膜-不覆膜 PM-NPM		1.3	1.3	1.1

低平均地温 1.7 和 1.2 °C。所有处理中秋深耕+秸秆还田+覆膜增温和稳温效果最好,较春旋耕+无秸秆还田+不覆膜分别提高苗期 5 cm 日平均地温和日最低平均地温 2.7 和 2.5 °C。

2.2 不同耕作覆盖处理对旱地玉米苗期表层土壤含水量的影响

秋深耕+秸秆还田播后苗前和苗期表层(0~10 cm)土壤水分得到显著改善(表4),起到秋保春墒,春旱秋防的目的,连续3年播后苗前和苗期0~10 cm 土壤含水量平均较春旋耕+无秸秆还田显著($P>0.01$)增加了 1.9 个百分点。其中 2012 年秋

深耕+秸秆还田苗期蓄水保墒效果不显著的原因可能和底墒很好有关,同时表明春旱越重的年份秋深耕+秸秆还田蓄水保墒效应越明显。覆膜的蓄水保墒作用在旱地玉米生产中得到显著体现,2011—2013 年覆膜处理播后苗前和苗期 0~10 cm 土壤含水量显著($P>0.01$)大于不覆膜处理,分别较不覆膜增加 2.4、2.6 和 2.9 个百分点,3 年平均较不覆膜增加 2.6 个百分点。所有处理中秋深耕+秸秆还田+覆膜处理蓄水保墒效果最好,较春旋耕+无秸秆还田+不覆膜提高了播后苗前和苗期 0~10 cm 土壤含水量 4.5 个百分点。

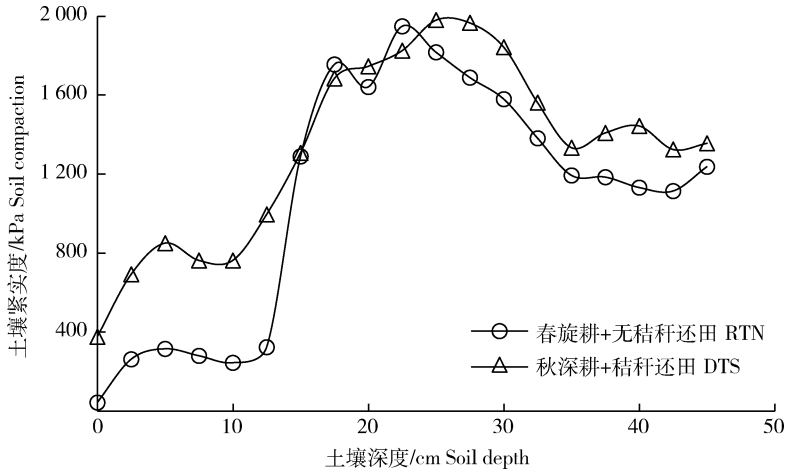
表4 不同耕作覆盖处理播后苗前和苗期土壤表层0~10 cm土壤含水量

Table 4 0-10 cm soil moisture of maize sowing and seedling stage under different tillage and mulch treatments

主区处理 Main plot treatment	裂区处理 Split plot treatment	2011	2012	2013
		播后苗前 Before seedling after sowing	苗期 Seedling stage	苗期 Seedling stage
秋深耕+秸秆还田 DTS	覆膜 PM	12.4 aA	14.5 aA	15.9 aA
	不覆膜 NPM	9.4 bB	12.0 bB	12.3 bB
	平均值 Average	10.9 aA	13.3 aA	14.1 aA
春旋耕+无秸秆还田 RTN	覆膜 PM	9.3 aA	14.0 aA	12.5 aA
	不覆膜 NPM	7.6 bB	11.4 bB	10.3 bB
	平均值 Average	8.5 bB	12.7 aA	11.4 bB
(秋深耕+秸秆还田)-(春旋耕+无秸秆还田) DTS-RTN		2.4	0.6	2.7
覆膜-不覆膜 PM-NPM		2.4	2.6	2.9

2.3 不同耕作覆盖处理对旱地玉米0~45 cm土壤紧实度的影响

2013年玉米苗期测定的土壤紧实度结果表明(图1),秋深耕+秸秆还田0~12.5 cm土壤紧实度显著大于春旋耕+无秸秆还田,平均为春旋耕+无秸秆还田的0.9~1.3倍,且不同层次有相同的趋势。从图1还可以看出,该区域耕层较浅,犁底层从17.5 cm到25.0 cm,厚度约为7.5 cm,虽经过深翻处理,但并未打破犁底层,建议通过深松来打破旧犁底层,增加耕层厚度,构造新的犁底层,达到蓄墒保墒保肥的目的。



DTS,秋深耕+秸秆还田,Deep tillage in autumn, straw returning
RTN,春旋耕+无秸秆还田 Rotary tillage in spring, no straw returning
下同。The same below.

图1 2013年不同耕作处理(不覆膜)0~45 cm土壤紧实度

Fig. 1 0—45 cm soil compaction under NPM of different tillage and mulch treatments in 2013

2.4 不同耕作覆盖处理对旱地玉米0~20 cm土壤肥力的影响

连续3年不同耕作覆盖处理后,土壤肥力状况明显不同(表5)。2013年秋收后秋深耕+秸秆还田0~20 cm土壤有机质含量平均较春旋耕+无秸秆还田增加5.8%,其中覆膜处理增加0.59 g/kg,不覆膜处理增加0.67 g/kg。秋深耕+秸秆还田土壤全氮、全磷和全钾也都有所增加,且全磷和全钾都较春旋耕+无秸秆还田有显著($P>0.01$)增加,分别增加了6.4%和6.1%。因此,秋深耕+秸秆还田后土壤肥力明显得到改善。而覆膜处理对0~20 cm土壤有机质、全磷、全钾含量没有显著影响,但土壤全氮含量显著高于不覆膜,增幅为8.6%。

2.5 不同耕作覆盖处理对旱地玉米产量及相关性影响

如表6所示,不同年份秋深耕+秸秆还田都较春旋耕+无秸秆还田表现出增产作用,2011—2014

土壤紧实度不利于地下土壤毛管水的利用,且容易跑墒,对春旱多发的旱地玉米出苗保苗来讲是非常不利的。从15.0 cm开始2个处理土壤紧实度基本一致,不同层次秋深耕+秸秆还田是春旋耕+无秸秆还田的0.9~1.3倍,且不同层次有相同的趋势。从图1还可以看出,该区域耕层较浅,犁底层从17.5 cm到25.0 cm,厚度约为7.5 cm,虽经过深翻处理,但并未打破犁底层,建议通过深松来打破旧犁底层,增加耕层厚度,构造新的犁底层,达到蓄墒保墒保肥的目的。

年平均增加经济产量12.2%,增加生物产量13.3%。由于不同年度土壤水热条件不同,因此增产幅度有所不同。2012年秋深耕+秸秆还田苗期土壤增温效应明显,但由于该年份底墒条件最好,蓄水保墒作用不明显,因此产量和春旋耕+无秸秆还田之间没有显著差异。而2011、2013和2014年秋深耕+秸秆还田经济产量都显著($P<0.01$)高于春旋耕+无秸秆还田,增幅分别为14.8%、19.3%和11.1%。2011—2013年秋深耕+秸秆还田经济产量的增加主要是由于百粒重的增加,而穗长、穗粗、穗行数和行粒数之间都没有显著差异。2014年为干旱年份,秋深耕+秸秆还田蓄水保墒效应明显,加之培肥地力的叠加效应,生物产量增产效果最好,较春旋耕+无秸秆还田增加了25.5%,但由于该年份生育后期旱情较重,源库失调,因此秋深耕+秸秆还田经济产量仅较春旋耕+无秸秆还田增加11.1%,其主要是由于行粒数的显著增加,平均较春旋耕+

无秸秆还田增加了 7.4%，最终收获指数显著 ($P < 0.05$) 小于春旋耕 + 无秸秆还田。不同年份覆膜都表现出显著的增产效应，2011—2014 年覆膜处理较不覆膜处理经济产量和生物产量分别平均增加了

25.3% 和 24.6%，其中经济产量增加主要是由于行粒数和百粒重的增加，较不覆膜增加了 13.9% 和 5.3%。所有处理中秋深耕 + 秸秆还田 + 覆膜处理经济产量和生物产量最高。

表 5 2013 年不同耕作覆盖处理 0~20 cm 土壤有机质和全量养分含量

Table 5 0-20 cm soil organic matter, total N, P and K under different tillage and mulch treatments in 2013 g/kg

主区处理 Main plot treatment	裂区处理 Split plot treatment	有机质 Soil organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K
秋深耕 + 秸秆还田 DTS	覆膜 PM	11.30 aA	0.91 aA	0.80 aA	17.11 aA
	不覆膜 NPM	11.68 aA	0.82 bB	0.83 aA	17.14 aA
	平均值 Average	11.49 aA	0.86 aA	0.82 aA	17.12 aA
春旋耕 + 无秸秆还田 RTN	覆膜 PM	10.71 aA	0.86 aA	0.75 aA	16.33 aA
	不覆膜 NPM	11.01 aA	0.82 bB	0.79 aA	15.95 aA
	平均值 Average	10.86 bB	0.84 aA	0.77 bB	16.14 bB
(秋深耕 + 秸秆还田) 较 (春旋耕 + 无秸秆还田) / % (DTS-RTN)/RTN		5.8	3.0	6.4	6.1
(覆膜) 较 (不覆膜) / % (PM-NPM)/NPM		-2.9	8.6	-3.9	1.1

2.6 不同耕作覆盖处理对旱地玉米水分利用效率的影响

不同耕作覆盖处理水分利用效率明显不同 (图 2 和图 3)，不论是覆膜处理还是不覆膜处理，秋深耕 + 秸秆还田 WUE 都高于春旋耕 + 无秸秆还田。2011—2014 年覆膜处理中，秋深耕 + 秸秆还田 WUE 较春旋耕 + 无秸秆还田平均增加 1.4 kg/(hm² · mm)，增幅为 5.4%，其中，由于地膜覆盖显著的增温保墒作用，因此覆膜处理中秋深耕 + 秸秆还田 WUE 仅在 2013 年显著 ($P < 0.01$) 高于春旋耕 + 无秸秆还田，增幅为 15.1%。而不覆膜处理中，秋深耕 + 秸秆还田的蓄水保墒、增温稳温和培肥地力的作用凸显，2011、2013 和 2014 年秋深耕 + 秸秆还田 WUE 都显著 ($P < 0.01$) 高于春旋耕 + 无秸秆还田，分别提高 4.5、2.8 和 3.6 kg/(hm² · mm)，增幅分别为 18.9%、12.2% 和 14.3%。

3 讨论

3.1 土壤温度

春季低温是影响冷凉区春玉米增产的一个重要

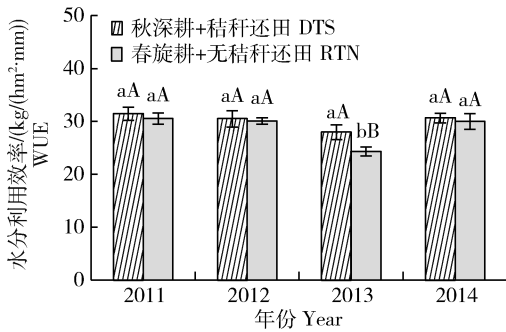
因素^[13]。玉米作为喜温作物，对低温的耐受程度较低，即使 1.0 °C 的温差也会对玉米生长发育造成影响^[14]。秋整地后，经过冬春冻融，有利于促进土壤熟化，改善土壤物理性状，地温高且变化平缓，具有保持和调节地温的作用^[15]。本研究表明秋深耕 + 秸秆还田有一定的增温稳温效应，苗期 5 cm 日平均地温和日最低平均地温 3 年平均分别提高 1.1 和 1.3 °C，且秸秆还田量大、休闲期降水多，其效果越明显，5 cm 日平均地温和日最低平均地温分别较春旋耕 + 无秸秆还田提高 1.7 和 2.8 °C。这可能和秋深耕 + 秸秆还田后土壤水分状况、土壤容重结构差异以及秸秆的腐解程度都有一定的关系^[3-4,16]。秋深耕 + 秸秆还田日平均温度的增加主要是由于日最低地温的增加，而日最低地温的增加主要是由于土壤含水量较大的缘故。因为土壤温度主要受土壤热容量与热传导率影响，土壤颗粒与土壤水分相比，具有较低的热容量和较高的热传导率，造成土壤含水量较高，土壤的温度变化幅度较小^[17]。地膜覆盖显著的增温作用和前人的研究结果是相同的^[3-4,16]。

表 6 2011—2014 年不同耕作覆盖处理玉米产量及相关性状
Table 6 Corn yield and related yield traits under different tillage and mulch treatments in 2011—2014

年份 Year	主区处理 Main plot treatment	裂区处理 Split plot treatment	穗长/cm Ear length	穗粗/cm Ear diameter	穗行数 Ear row number	行粒数 Grain number per row	百粒重/g 100-grains weight	经济产量/ (kg/hm ²) Grain yield	生物产量/ (kg/hm ²) Shoot biomass	收获指数 Harvest index	
2011	秋深耕 + 秸秆还田 DTS	覆膜 PM	17.5 aA	4.8 aA	14.2 aA	39.1 aA	31.7 aA	11 905.5 aA	22 638.2 aA	52.6% aA	
		不覆膜 NPM	17.6 aA	4.8 aA	15.2 aA	34.4 bB	30.7 aA	10 454.5 bB	19 424.0 bB	53.9% aA	
		平均值 Average	17.6 aA	4.8 aA	14.7 aA	36.8 aA	31.2 aA	11 180.0 aA	21 031.1 aA	53.3% aA	
	春深耕 + 无秸秆还田 RTN	覆膜 PM	17.5 aA	4.7 aA	14.0 aA	39.5 aA	30.0 aA	11 424.0 aA	21 851.7 aA	52.0% aA	
		不覆膜 NPM	17.5 aA	4.5 aA	14.4 aA	34.6 bB	29.0 aA	8 056.0 bB	15 906.2 bB	53.0% aA	
		平均值 Average	17.5 aA	4.6 aA	14.2 aA	37.1 aA	29.5 bB	9 740.0 bB	18 879.0 bB	52.5% aA	
	(秋深耕 + 秸秆还田) 较(春深耕 + 无秸秆还田) (DTS-RTN)/RTN										
	2012	秋深耕 + 秸秆还田 DTS	覆膜 PM	16.3 aA	4.6 aA	13.7 aA	39.0 aA	33.2 aA	11 836.9 aA	20 392.6 aA	58.1% aA
			不覆膜 NPM	15.8 aA	4.5 aA	14.2 aA	33.0 bB	29.8 bB	8 490.4 bB	14 626.1 bB	60.2% aA
			平均值 Average	16.1 aA	4.5 aA	13.9 aA	36.0 aA	31.5 aA	10 163.7 aA	17 509.3 aA	59.2% aA
春深耕 + 无秸秆还田 RTN		覆膜 PM	16.0 aA	4.6 aA	14.1 aA	38.1 aA	31.7 aA	11 361.0 aA	19 085.8 aA	59.6% aA	
		不覆膜 NPM	15.8 aA	4.5 aA	14.8 aA	31.4 bB	28.7 bB	8 086.5 bB	14 530.8 bB	60.4% aA	
		平均值 Average	15.9 aA	4.6 aA	14.4 aA	34.8 aA	30.2 aA	9 723.7 aA	16 808.3 aA	60.0% aA	
(秋深耕 + 秸秆还田) 较(春深耕 + 无秸秆还田) (DTS-RTN)/RTN											
— 1.4% 11.4% 14.8% 5.8% -0.8% 3.5% 4.3% 0.3% 16.3 aA 15.8 aA 16.1 aA 16.0 aA 15.8 aA 15.9 aA -0.9% 0.9% -3.3% 3.4% 4.3% 4.5% 4.2% -1.4%											

表 6(续)

年份 Year	主区处理 Main plot treatment	裂区处理 Split plot treatment	穗长/cm Ear length	穗粗/cm Ear diameter	穗行数 Ear row number	行粒数 Grain number per row	百粒重/g 100-grains weight	经济产量/ (kg/hm ²) Grain yield	生物产量/ (kg/hm ²) Shoot biomass	收获指数 Harvest index	
2013	秋深耕+ 秸秆还田	覆膜 PM	16.8 aA	4.4 aA	14.8 aA	35.9 aA	31.3 aA	11 424.4 aA	20 001.8 aA	55.7% aA	
		不覆膜 NPM	15.9 aA	4.3 aA	14.5 aA	32.1 bB	28.9 bA	9 468.3 bB	16 463.0 bB	57.5% aA	
	DTS	平均值 Average	16.4 aA	4.4 aA	14.6 aA	34.0 aA	30.1 aA	10 446.3 aA	18 232.4 aA	56.6% aA	
		春深耕+ 无秸秆还田	覆膜 PM	16.3 aA	4.3 aA	14.8 aA	36.0 aA	27.1 aA	9 447.2 aA	17 873.6 aA	52.2% aA
	RTN	不覆膜 NPM	15.8 aA	4.2 aA	14.0 aA	33.7 bB	25.9 bA	8 069.7 bB	14 404.5 bB	56.4% aA	
		平均值 Average	16.1 aA	4.2 aA	14.4 aA	34.9 aA	26.5 bB	8 758.4 bB	16 139.0 bB	54.3% aA	
	(秋深耕+秸秆还田)										
	较(春深耕+无秸秆还田)										
	(DTS-RTN)/RTN										
	2014	秋深耕+ 秸秆还田	覆膜 PM	16.2 aA	4.6 aA	15.2 aA	35.2 aA	33 aA	11 274.2 aA	20 530.8 aA	54.8% aA
不覆膜 NPM			15.9 aA	4.5 aA	14.6 aA	31.7 bB	32.9 aA	10 047.4 bB	19 306.4 bA	56.2% aA	
DTS		平均值 Average	16.1 aA	4.6 aA	14.9 aA	33.5 aA	33.0 aA	10 660.8 aA	19 918.6 aA	55.5% bA	
		春深耕+ 无秸秆还田	覆膜 PM	15.8 aA	4.4 aA	14.9 aA	33.3 aA	32.5 aA	10 609.2 aA	17 832.3 aA	57.4% aA
RTN		不覆膜 NPM	14.7 bA	4.4 aA	14.3 aA	29.0 bB	32.0 aA	8 590.7 bB	13 920.2 bB	61.2% aA	
		平均值 Average	15.3 bA	4.4 aA	14.6 aA	31.2 bB	32.3 aA	9 599.9 bB	15 876.2 bB	59.3% aA	
(秋深耕+秸秆还田)											
较(春深耕+无秸秆还田)											
(DTS-RTN)/RTN											
(秋深耕+秸秆还田)											
平均较(春深耕+无秸秆还田)											
(DTS-RTN)/RTN											
(覆膜)平均较(不覆膜)											
(PM-NPM)/NPM											



不同小写字母表示差异达显著水平 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示差异达极显著水平 ($P < 0.01$)。下同。

Within the figure the different capital letters in the figure mean significant difference at 0.01 level and the different lowercase letters mean significant different at 0.05 level. The same below.

图2 不同耕作覆盖处理(覆膜)水分利用效率

Fig. 2 WUE of PM under different tillage and mulch treatments

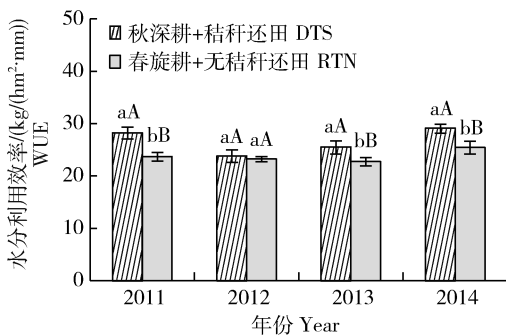


图3 不同耕作覆盖处理(不覆膜)水分利用效率

Fig. 3 WUE of NPM under different tillage and mulch treatments

3.2 土壤水分

合理的耕作覆盖方式有利于改善播期耕层土壤水分状况,为春玉米出苗保苗和前期生长创造良好的土壤环境^[4-6,18]。本研究结果表明,秋深耕+秸秆还田播后苗前和苗期0~10 cm土壤含水量平均较春旋耕+无秸秆还田增加了1.9个百分点,其中春旱越重的年份秋深耕+秸秆还田蓄水保墒效应越明显。主要是由于该处理在播种前未进行土壤耕作,减少了对土壤的扰动,在春季干旱多风天气下有效降低了土壤蒸发,同时秋深耕可增加休闲期降水入渗,因而玉米生育前期土壤含水量较高^[15]。另外秸秆还田后土壤物理性状改变、土壤蓄水保墒能力提高也是其中原因^[10-11]。而赵亚丽等^[11,19-20]认为秸秆粉碎还田增加了土壤的表层蒸发,这可能和不同的种植制度、秸秆还田后土壤水分测定的时期以及所

参照的对照不同有关。

3.3 土壤紧实度

土壤紧实度直接关系到玉米的出苗与根系生长,太高和太低的土壤紧实度都不利于玉米出苗保苗和生长发育^[15,21]。本研究结果表明,秋深耕+秸秆还田苗期0~12.5 cm土壤紧实度显著大于春旋耕+无秸秆还田,平均为春旋耕+无秸秆还田的3.0倍,较大的土壤紧实度有利于地下土壤毛管水的利用,提墒保墒,对抗旱播种保苗是非常有利的。虽然秋深耕+秸秆还田在苗期有较高的土壤紧实度,但一般认为阻止根系伸展的土壤紧实度临界值为2 000 kPa^[22],本研究中2个处理最大土壤紧实度都未超过此值,可以认为不同耕作措施下,较大的土壤紧实度对玉米生长没有明显的限制作用^[15]。

3.4 土壤肥力

深耕能够改善土壤的通透性,促进土壤中有机的腐殖化过程,使土壤有机质含量提高,而秸秆中含有大量有机物质,还田后可以显著增加土壤有机质含量,提高土壤的养分水平^[9,12-13,23]。本研究也得到同样的研究结果,连续3年秋深耕+秸秆还田后0~20 cm土壤有机质含量平均较春旋耕+无秸秆还田增加了5.8%,土壤全氮、全磷和全钾也分别增加了3.0%、6.4%和6.1%。地膜覆盖土壤有机质、全氮、全磷和全钾中仅土壤全氮显著高于春旋耕+无秸秆还田,增幅为8.6%。而张杰等^[24]的研究结果表明,地膜覆盖均能增加土壤耕层土壤全养分含量,这可能是地膜覆盖的增温保墒效应促进了土壤养分的转化、释放和吸收,表现在作物生育前期,而本研究结果是在作物收获后测定的。

3.5 产量及水分利用效率

合理的耕作方式和秸秆还田组合不但可以改善土壤的水、肥、气和热状况,同时有利于作物的生长发育,最终提高旱地玉米的产量^[3,6,10,12]。深翻使得受扰动土层土壤固液气三相相比更加协调^[25],更有利于作物的生长发育和产量的提高,并且在连年秸秆还田条件下,这种优势表现得更加明显^[12]。本研究结果中,秋深耕+秸秆还田具有蓄水保墒、增温稳温和培肥土壤等效应,因此连续4年经济产量和生物产量分别平均较春旋耕+无秸秆还田增加12.2%和13.3%。丰水年增产的原因主要是百粒重的增加,而干旱年份增产的主要原因是行粒数的增加。冷凉区旱地玉米地膜覆盖的增温保墒增产效应再一次得到了验证^[24,26],连续4年覆膜处理较不覆膜处

理经济产量和生物产量分别增加 25.3% 和 24.6%，其中经济产量增加主要是由于行粒数和百粒重的增加，分别较不覆膜增加 13.9% 和 5.3%。秋深耕+秸秆还田最终较春旋耕+无秸秆还田提高了旱地玉米水分利用效率，但覆膜处理后，由于地膜覆盖显著的增温保墒作用占主导作用，因此水分利用效率平均增加了 5.4%，而不覆膜处理中，秋深耕+秸秆还田蓄水保墒、增温稳温和培肥地力作用凸显，因此连续 4 年平均增幅为 12.0%。所有处理中秋深耕+秸秆还田+地膜覆盖玉米产量和水分利用效率最高。

4 结 论

秋深耕+秸秆还田+覆膜可协调土壤水、肥、气、热关系，起到蓄水保墒、增温稳温和培肥地力的作用，最终达到增产高效的目的，是目前低温冷凉、春旱频发和土壤肥力持续下降地区应该大力推广的土壤耕作覆盖措施。

参考文献 References

[1] 张冬梅, 张伟, 刘恩科, 姜春霞, 陈琼, 韩彦龙, 黄学芳, 刘化涛, 赵聪, 池宝亮. 早熟区不同播期旱地玉米产量对施肥水平和种植密度的响应[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(12): 1449-1458
Zhang D M, Zhang W, Liu E K, Jiang C X, Chen Q, Han Y L, Huang X F, Liu H T, Zhao C, Chi B L. Response of dryland maize yield to fertilization rate and planting density at different sowing dates in early-maturity areas[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(12): 1449-1458 (in Chinese)

[2] 张冬梅, 姜春霞, 黄学芳, 刘恩科, 闫六英, 刘化涛, 陈琼, 张伟, 韩彦龙. 早熟区不同熟期玉米品种产量对播期和施肥方式的响应[J]. 中国农学通报, 2015, 31(24): 59-66
Zhang D M, Jiang C X, Huang X F, Liu E K, Yan L Y, Liu H T, Chen Q, Zhang W, Han Y L. Response of yields of different maturity maize varieties to sowing time and fertilization method in early-mature area[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(24): 59-66 (in Chinese)

[3] 谢军红, 张仁陟, 李玲玲, 罗珠珠, 蔡立群, 柴强. 耕作方法对黄土高原旱作玉米产量和土壤水温特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(11): 1384-1393
Xie J H, Zhang R Z, Li L L, Luo Z Z, Cai L Q, Chai Q. Effect of different tillage practice on rain-fed maize yield and soil water/temperature characteristics in the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(11): 1384-1393 (in Chinese)

[4] 宋振伟, 郭金瑞, 邓艾兴, 寇太记, 任军, 张卫建. 耕作方式对东

北春玉米农田土壤水热特征的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 108-114
Song Z W, Guo J R, Deng A X, Kou T J, Ren J, Zhang W J. Effects of surface tillage regimes on soil moisture and temperature of spring corn farmland in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(16): 108-114 (in Chinese)

[5] 张少良, 张兴义, 刘晓冰, 刘爽, 于同艳. 典型黑土侵蚀区不同耕作措施的水土保持功效研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 11-15
Zhang S L, Zhang X Y, Liu X B, Liu S, Yu T Y. Tillage effect on soil erosion in typical black soil region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3): 11-15 (in Chinese)

[6] 卫晓轶, 魏锋, 洪德峰, 马俊峰, 马毅, 张学舜. 不同耕作方式对夏玉米灌浆及产量性状的影响[J]. 河南农业科学, 2013, 42(8): 21-23
Wei X Y, Wei F, Hong D F, Ma J F, Ma Y, Zhang X S. Effect of tillage system on grain filling and yield traits of summer maize. [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2013, 42(8): 21-23 (in Chinese)

[7] 杨雪, 逢焕成, 李铁冰, 任天志, 董国豪, 郭智慧, 王湘峻. 不同耕作方法对土壤水温动态和春玉米产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(2): 29-37
Yang X, Feng H C, Li L B, Ren T Z, Guo Z H, Wang X J. Effect of different tillage treatments on soil water, temperature changes and spring corn yield in high yield region in North China Plain[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(2): 29-37 (in Chinese)

[8] 沈学善, 李金才, 屈会娟, 魏凤珍, 张一. 砂姜黑土区秸秆还田对玉米生育及水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(2): 28-33
Shen X S, Li J C, Qu H J, Wei F Z, Zhang Y. Effects of straw returned to the field on growth and water use efficiency of maize in lime concretion black soil region[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(02): 28-33 (in Chinese)

[9] 徐萌, 张玉龙, 黄毅, 张玉玲, 虞娜, 闫洪亮, 邹洪涛. 秸秆还田对半干旱区农田土壤养分含量及玉米光合作用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 153-156
Xu M, Zhang Y L, Huang Y, Zhang Y L, Yu N, Yan H L, Zou H T. Effects of returning straw to field on soil nutrient content and corn photosynthesis in semiarid region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(4): 153-156 (in Chinese)

[10] 李亭亭. 不同耕作及秸秆还田方式对春玉米产量形成及养分吸收的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013
Li T T. Effects of different tillage managements on nutrition absorption and yield of maize with maize straw in the field[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2013 (in Chinese)

[11] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 穆心愿, 李潮海. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(17): 3359-3371

- Zhao Y L, Xue Z W, Guo H B, MU X Y, Li C H. Effects of tillage and straw returning on water consumption characteristics and water use efficiency in the winter wheat and summer maize rotation system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47 (17):3359-3371 (in Chinese)
- [12] 战秀梅, 彭靖, 李秀龙, 李亭亭, 韩晓日, 宋涛, 潘全良. 耕作及秸秆还田方式对春玉米产量及土壤理化性状的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(3):204-209
- Zhan X M, Peng J, Li X L, Li T T, Han X R, Song T, Pan Q L. Effects of tillage and crop residues incorporation on spring maize yield and physical and chemical properties of soil [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2014, 29 (3): 204-209 (in Chinese)
- [13] Qin R J, Stamp P, Richner W. Impact of tillage on maize rooting in a Cambisol and Luvisol in Switzerland [J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 85(1/2):50-61
- [14] Barlow E W R, Boersma L, Young J L. Photosynthesis, transpiration, and leaf elongation in corn seedlings at suboptimal soil temperatures [J]. *Agronomy Journal*, 1977, 69 (1):95-100.
- [15] 宋振伟, 邓艾兴, 郭金瑞, 任军, 闫孝贡, 张卫建. 整地时期对东北雨养区土壤含水量及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5):254-258+263
- Song Z W, Deng A X, Guo J R, Ren J, Yan X G, Zhang W J. Impacts of soil preparation period of soil water storage and corn (*Zea mays* L) yield in rain-fed Area of northeast China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (5): 254-258+263 (in Chinese)
- [16] 朱琳, 刘毅, 徐洪敏, 陈新平, 李世清. 黄土旱塬不同水分管理模式对旱作春玉米土壤温度的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42 (12):4396-4402
- Zhu L, Liu Y, Xu H M, Chen X P, Li S Q. Effects of water management patterns in spring maize cultivation on the dryland soil temperature dynamics in the Loess Plateau [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(12):4396-4402 (in Chinese)
- [17] Hillel D. *Environmental Soil Physics* [M]. San Diego: Academic Press, 1998
- [18] Chen Y, Liu S, Li H, Li X F, Song C Y, Cruse R M, Zhang X Y. Effects of conservation tillage on corn and soybean yield in the humid continental climate region of Northeast China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 115/116:56-61
- [19] 孙宏勇, 刘昌明, 张喜英, 陈素英, 裴冬. 不同行距对冬小麦蒸发、蒸散和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3):22-26
- Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, Chen S Y, Pei D. Effects of different row spacings on soil evaporation, evapotranspiration and yield of winter wheat [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(3):22-26 (in Chinese)
- [20] Schwartz R C, Baumhardt R L, Evett S R. Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season [J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 110(2):221-229
- [21] Wong S C, Li X D, Zhang G, Qi S H, Min Y S. Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, south China [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 119(1):33-44
- [22] Zhu Y G, Hen S B, Yang J C. Effects of soil amendments on lead uptake by two vegetable crops from a lead-contaminated soil from Anhui, China [J]. *Environment International*, 2004, 30(3):351-356
- [23] 梁金凤, 齐庆振, 贾小红, 宫少俊, 黄元仿. 不同耕作方式对土壤性质与玉米生长的影响研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4):945-950
- Liang J F, Qi Q Z, Jia X H, Gong S J, Huang Y F. Effects of different tillage managements on soil properties and corn growth [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4):945-950 (in Chinese)
- [24] 张杰. 环保型地膜覆盖对土壤环境的影响及玉米生长的响应 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010
- Zhang J. Influences of different covering materials mulching on soil environment and response of the corn growth [D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2010 (in Chinese)
- [25] 李明德, 刘琼峰, 吴海勇, 汤睿, 戴子武. 不同耕作方式对红壤旱地土壤理化性状及玉米产量的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4):1522-1526
- Li M D, Liu Q F, Wu H Y, Tang R, Dai Z W. Effects of different cultivation on soil physico-chemical properties of upland red soils and maize yield [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2009, 18(4):1522-1526 (in Chinese)
- [26] 刘恩科, 姜春霞, 黄学芳, 张冬梅, 张伟, 韩彦龙, 刘化涛, 闫六英, 陈琼, 赵聪. 覆膜方式对土壤环境及玉米产量的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(27):46-52
- Liu E K, Jiang C X, Huang X F, Zhang D M, Zhang W, Han Y L, Liu H T, Yan L Y, Chen Q, Zhao C. Study on soil environment and maize yield under different plastic film mulching modes [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(27):46-52 (in Chinese)

责任编辑:吕晓梅