

海河平原秸秆覆盖和春季灌水对小麦玉米 产量和水分利用的影响

郑媛媛, 王贵彦, 张建恒

(河北农业大学农学院, 河北 保定 07100)

摘要: 针对海河平原水资源短缺和小麦-玉米水分利用现状, 通过 2013—2015 年大田试验, 设置春季不灌水、春季不灌水+秸秆覆盖、春季 1 水、春季 1 水+秸秆覆盖四个处理, 研究了春季灌水和秸秆覆盖对小麦-玉米两熟作物生长、产量和水分利用的影响。结果表明: 灌水和秸秆覆盖效应主要体现在小麦拔节到开花期。小麦拔节~开花期, 由于灌溉和秸秆覆盖保温保墒作用, 两个生长季中, 春季 1 水秸秆覆盖 LAI 高于 1 水不覆盖处理, 但开花期后这种效应逐渐消失, 花后 10 天和 20 天覆盖 LAI 低于不覆盖处理, 且差异显著; 春季不灌水由于水分胁迫, 无论秸秆覆盖与否, LAI 差异不显著。2013—2014 年, 和不覆盖相比, 春季 0 水覆盖产量降低了 1.46%, 春季 1 水处理覆盖后降低了 2.76%; 2015 年春季 0 水覆盖降低了 2.78%, 春季 1 水覆盖降低了 1.11%。但春季灌溉 1 水后, 与不灌水相比, 2014 年产量差异显著, 2015 年差异不显著。随着灌溉水量的增加, 土壤耗水量减少, 两年中小麦生长季土壤耗水量都表现为春季 0 水大于春季 1 水, 且差异显著; 相同水分条件下不覆盖大于覆盖处理, 但差异不显著。不同处理小麦生长季土壤耗水量的差异及玉米生长期间的降水量共同影响了玉米土壤耗水量, 覆盖处理的耗水量小于不覆盖处理。从水分利用效率看, 小麦、玉米和周年土壤水分利用效率各处理间和年份间都没有显著差异。海河平原水分有限条件下, 秸秆覆盖后在小麦需水敏感期限量灌水在保证产量基础上可降低耗水量, 因此春季灌溉 1 水结合秸秆覆盖是实现本区域小麦-玉米种植制度节水的有效措施。

关键词: 秸秆覆盖; 水分利用效率; 小麦-玉米; 作物产量

中图分类号: S342.1 文献标志码: A

Impacts on the yield and water use efficiency of wheat and maize under Spring-irrigation and straw mulching in Haihe Plain

ZHENG Yuan-yuan, WANG Gui-yan, ZHANG Jian-heng

(College of Agronomy, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract: Water scarcity in Haihe plain has a serious impact on water utilization and growth of wheat-maize double cropping system. To investigate the effects of spring-irrigation and straw-mulching on the crop growth, yield and water utilization of wheat and maize, four field-experiment treatments, Spring-no-irrigation, Spring-no-irrigation/straw-mulching, Spring-irrigation once, and Spring-irrigation once/straw-mulching were carried out in 2013—2015. The results showed that, irrigation and straw-mulching had significant impacts on the crop during jointing-flowering stage of wheat. Due to preservation of soil moisture and soil temperature by straw-mulching during this stage, the LAI value with Spring-irrigation once/straw-mulching treatment scores significantly was higher than the Spring-irrigation once treatment. But the effects then gradually disappeared after flowering stage. The straw-mulching treatment had a significantly lower LAI value than no-straw-mulching treatment after 10 and 20 days from flowering. With or without straw-mulching, the LAI values with Spring-no-irrigation treatments were similar, probably due to the water stress. Compared with no-straw-mulching treatment, the yield of wheat decreased by 1.46% under Spring-no-irrigation and decreased 2.76% under Spring-irrigation in 2013—2014. Separately, the decreases were 2.78% and 1.11% in 2015. The Spring-irrigation once and no-irrigation treatments had a significant difference in crop yields in 2014, but not in 2015.

收稿日期: 2016-11-18

修回日期: 2017-02-22

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目“粮食丰产科技工程”(2013BAD07B05)

作者简介: 郑媛媛(1991—), 女, 河北赤城人, 硕士研究生, 主要从事作物栽培学与耕作学研究。E-mail: 392450148@qq.com。

通信作者: 王贵彦(1971—), 女, 教授, 主要从事作物栽培学与耕作学研究。E-mail: guiyangwang@sina.com。

With the increasing level of irrigation, the soil water consumption amount decreased. The soil water consumption in wheat growing was greatly increased with no-irrigation treatment in spring than Spring – irrigation once treatment in the two years. No-straw-mulching had greater soil water consumption than straw – mulching treatment, though the difference was not significant. Together with the rainfall effect during maize growth, the effect caused a less soil water consumption with straw – mulching treatment than no mulching. For the water – use efficiency, wheat, maize and all the treatments in different years had no significant difference. Our results indicated that, straw – mulching guaranteed crop yield by decreasing soil water consumption during wheat water – sensitive stage under limited irrigation condition due to water scarcity in Haihe plain. The combination of spring – irrigation once with straw – mulching was very effective for water – saving wheat – maize double cropping system in the region.

Keywords: straw mulching; water use efficiency; wheat – maize double cropping system; grain yield

冬小麦 – 夏玉米是海河平原主要种植制度,近年来,小麦、玉米总产量达 $3.2 \times 10^7 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[1],是华北平原主要粮食生产区域之一。然而水资源短缺是限制该区域粮食生产,特别是小麦生产的主要因素^[2]。根据多年历史气象资料,该区域多年平均降水量 538 mm,且降水的 80% 集中在 7—9 月份,在小麦生长的 10 月到第二年 6 月初期间,降水较少,因此小麦主要依靠地下水灌溉才能获得较高的产量。根据小麦 – 玉米一年两熟实际平均蒸散量和降水量的差值,每年平均需抽取 300 mm 地下水进行灌溉,常年抽取地下水导致该区域地下水位以 $1 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度下降,而在作物耗水构成中,土壤棵间蒸发占农田耗水的 20% ~ 30%^[3-4],属无效耗水。

截止目前,针对小麦、玉米农艺节水已进行了大量研究^[5-7],如耕作保墒技术^[8]、水肥耦合技术^[9]、调整耗水作物布局^[10]、秸秆和地膜覆盖^[11]等方面都起到了节水和提高水分利用效率的作用。其中地膜覆盖主要用于西北等干旱地区,其保墒和稳增等效果显著,是保证干旱区域农业生产的重要措施之一。试验证明,通过地膜覆盖,玉米农田的水分利用效率比不覆盖提高 10.6%,冬小麦的水分利用效率提高了 25%^[12-13]。海河平原小麦地膜覆盖试验结果表明,通过地膜覆盖,小麦生长季可节水 116.4 ~ 157.1 mm,水分利用效率提高 28.1% ~ 40.9%^[14];对于玉米生长季的模拟研究结果表明,地膜 50% 覆盖和 100% 覆盖,正常灌溉情景下,可分别减少蒸发 24% 和 49%,耗水量分别降低 9.41% 和 15.33%,水分利用效率则分别提高 3.96% 和 6.46%;而在小麦 – 玉米生长季无灌溉情况下,节水效果更明显,可分别减少蒸发 28% 和 61.5%^[15]。

秸秆覆盖是海河平原小麦、玉米生产中重要节水措施之一。秸秆覆盖阻碍土壤与大气间的水分与能量交换,调节土壤供水状况,促使农田水分对于作物生长需求趋于协调,从而提高水分利用效率,调节

土壤温度,抑制农田棵间蒸发^[16-21]。左余宝等^[22]研究发现,秸秆覆盖的小麦 – 玉米周年水分利用效率比常规耕作高 19.5%。解文艳等^[23]研究表明,在玉米生育期内秸秆覆盖比不覆盖种植水分利用效率提高 0.224 ~ 0.550 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。陈素英等的研究结果^[24-25]显示,在太行山前平原,玉米秸秆覆盖冬小麦,覆盖量为 3 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时冬季 0 ~ 10 mm 年平均地温提高 0.3 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$,春季降低 0.42 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$,并有增产的作用,较不覆盖处理增产 2.7%。

目前,大多数研究对地膜或秸秆覆盖结合春季灌溉对小麦生长和节水效应进行了大量分析,而这些措施对于夏玉米的后效作用研究较少。海河平原降水时空分布特点和小麦 – 玉米种植制度需水特性要求以小麦 – 玉米一年两熟为研究对象,系统考虑和分析全年土壤水分变化动态,从而采取相应措施提高周年土壤水分利用效率,是本区域实现节水的重要途径。本研究通过小麦生长季秸秆覆盖和不同水分处理相结合的田间试验,分析秸秆覆盖和灌水对小麦和玉米不同生育时期叶面积、地上部生物量、耗水特性及土壤水分周年变化等田间应用效果,为海河平原秸秆覆盖提高小麦 – 玉米周年水分利用效率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于 2013—2015 年在河北农业大学辛集实验站进行。辛集实验站位于河北省山前平原和黑龙港平原的过渡地带 (N37°47′58.30″、E115°17′53.23″,海拔 32 m),土壤为砂质潮土,属北温带季风半湿润气候,年降水量 500 ~ 600 mm,主要分布在 6—9 月,小麦生长季(10 月—次年 5 月)多年平均降水量 65 ~ 100 mm ^[1],年平均气温 12.7 $^{\circ}\text{C}$,地下水埋深 10 m 以下。试验地田间持水量 23.9% ~ 39.8%,土壤容重为 1.14 ~ 1.52 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。土壤基础地力:有

机质 8.5 g·kg⁻¹、速效磷 11.2 mg·kg⁻¹、速效钾 97 mg·kg⁻¹。

试验期间小麦、玉米不同生育阶段的降水量如表 1 所示。

表 1 小麦、玉米不同生育阶段的降水量和积温
Table 1 Precipitation during wheat and maize growing season

生育阶段 Fertility stage		2013—2014		2014—2015	
		日期 Date	降雨 Rainfall/mm	日期 Date	降雨 Rainfall/mm
小麦 Wheat	播种 ~ 冬前 Sowing ~ Pre-dormance	10 - 08—12 - 15	12.60	10 - 07—12 - 14	10.00
	冬前 ~ 返青 Pre-dormance ~ Recovery	12 - 15—03 - 16	10.70	12 - 14—03 - 14	6.90
	返青 ~ 拔节 Recovery ~ Jointing	03 - 16—04 - 11	0.10	03 - 14—04 - 09	25.60
	拔节 ~ 开花 Jointing ~ Flowering	04 - 11—04 - 30	42.30	04 - 09—04 - 28	4.30
	开花 ~ 孕穗 Flowering ~ Heading	04 - 30—05 - 05	22.50	04 - 28—05 - 06	21.50
	孕穗 ~ 成熟 Heading ~ Harvest	05 - 05—06 - 20	38.10	05 - 06—06 - 12	56.20
	全生育期 Whole growth period		126.30		124.50
玉米 Maize	播种 ~ 苗期 Sowing ~ Seedling stage	06 - 20—06 - 27	12.60	06 - 12—06 - 22	0.40
	苗期 ~ 拔节期 Seedling stage ~ Jointing	06 - 27—07 - 15	4.50	06 - 22—07 - 16	22.60
	拔节期 ~ 大喇叭口期 Jointing ~ Large bell mouth period	07 - 15—08 - 06	64.50	07 - 16—08 - 05	51.30
	大喇叭口期 ~ 开花 Large bell mouth period ~ Flowering	08 - 06—08 - 13	13.80	08 - 05—08 - 17	0.00
	开花 ~ 灌浆 Flowering ~ Grouting	08 - 13—09 - 15	39.40	08 - 17—09 - 21	146.00
	灌浆 ~ 成熟 Grouting ~ Harvest	09 - 15—10 - 07	22.50	09 - 21—09 - 29	0.40
	全生育期 Whole growth period		157.30		220.70

1.2 试验设计

2013—2015 年小麦季试验共设 4 个处理,(1) 春季 0 水,即小麦越冬期后不灌溉(CK);(2) 春季 0 水覆盖,即越冬期于行间进行玉米秸秆覆盖,越冬期后不灌溉;(3) 春季 1 水,即拔节期进行灌溉,灌水量 70 mm;(4) 春季 1 水覆盖,即在秸秆覆盖基础上,拔节期进行灌溉,灌水量 70 mm。为保证小麦正常出苗和冬季需水,所有处理播前进行了灌溉,灌水量 70 mm。2013—2014 年生长季小麦于 10 月 8 日播种,2014 年 6 月 20 日收获;玉米于 2014 年 6 月 20 日播种,10 月 7 日收获。2014—2015 年生长季小麦 10 月 7 日播种,2015 年 6 月 12 日收获;玉米于 2015 年 6 月 12 日播种,9 月 29 日收获。小麦供试品种为冀麦 585,播种量 180 kg·hm⁻²,用粉碎后的全株玉米秸秆进行地表覆盖,覆盖量为 5 200 kg·hm⁻²。全生育期施肥量为 N 240 kg·hm⁻²、P₂O₅ 150 kg·hm⁻²、K₂O 150 kg·hm⁻²,磷、钾肥全部底施,氮肥 30% 底施,70% 在拔节期随灌水追施,其他田间管理同高产农田;玉米供试品种为郑单 958,小麦收获后免耕播种,密度 67 500 株·hm⁻²,全生育期施 N 240 kg·hm⁻²,其他田间管理同高产农田。生长期根据降水情况进行补充灌溉,2014 和 2015 年生长期间于播种、大喇叭口期和抽雄期进行灌溉,总灌水量 180

mm。各处理 3 次重复,小区面积 50 m²,不同处理间设 2 米隔离区。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 土壤温度测定 使用 MicroLite (型号 LITE5032P) 的优盘温度计,分别置于土层下 5 cm 处,设置每天间隔两个小时进行自动记录,自越冬期到拔节期进行土壤温度测定。根据气象学标准计算每日平均温度。

1.3.2 土壤含水量测定和田间耗水量计算 在小麦、玉米生长期每 20 cm 为一层次用土钻取土,采用烘干法测定 0~200 cm 各层次土壤含水量。计算公式如下^[26]:

土壤含水量(体积%) = 土壤重量含水量(%) × 土壤容重

水层厚度(mm) = 土层厚度(mm) × 土壤含水量(体积%)

土壤水消耗量(mm) = 本生育阶段初水层厚度 - 本生育阶段末水层厚度

田间耗水量(mm) = 土壤水消耗量 + 降水量 + 灌溉量 + 地下水补给量 - 径流量 - 渗漏量

因本研究区域地势平坦,试验地点的地下水埋深 10 m 以下,灌溉时利用水表控制灌溉量。因此,计算公式中的地下水补给量、渗漏量、径流量均忽略

不计。

1.3.3 作物产量测定 小麦成熟后,每小区根据定点的一米双行,计测穗数,将麦穗收获后风干,从中随机取 50 穗,测定穗粒数,脱粒后随机取 3 份样品,每份样品 1 000 粒,烘干后称重,计算千粒重。同时,在小麦成熟时每小区选取 2 m×2 m 的样点,收获脱粒后计算实测产量(含水量 13%)。玉米成熟后在各小区选取 8 m 四行,计测穗密度,收获脱粒后实测产量(含水量 14%)、穗粒数和百粒重。

1.3.4 叶面积指数(LAI)和干物质测定 在小麦、玉米各个生育时期(小麦:越冬期、返青期、拔节期、开花期、孕穗期,花后 10 天、20 天及成熟期;玉米:苗期、拔节、大喇叭口、开花、灌浆、成熟期)测定其叶面积(小麦叶面积=叶长×叶宽×0.83;玉米叶面积=叶长×叶宽×叶面积系数,玉米展开叶的叶面积系数为 0.75,未展开叶的系数为 0.5)和地上部分器官生物量(每个处理取 5~10 株有代表性的植株作

为样株,各器官分开,105℃杀青 30 分钟,80℃烘干至衡重,然后称重。)

1.3.5 水分利用效率的计算

水分利用效率^[27]($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$)=籽粒产量/田间耗水量

1.4 统计分析

用 Microsoft Excel 2003 整理数据和绘图,用 SPSS version.16.0 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖与不覆盖对土壤温度的影响

秸秆覆盖与不覆盖相比(图 1),土壤 5 cm 地温显示,冬小麦越冬期到返青期日均土壤温度差值为 0.18℃,日均气温为 2.08℃;返青期到拔节期日均土壤温度差值为 -0.28℃,日均温度为 2.78℃。由此可以看出,秸秆覆盖后,土壤温度变化较缓和,且升温效应随着空气温度的升高而减小。

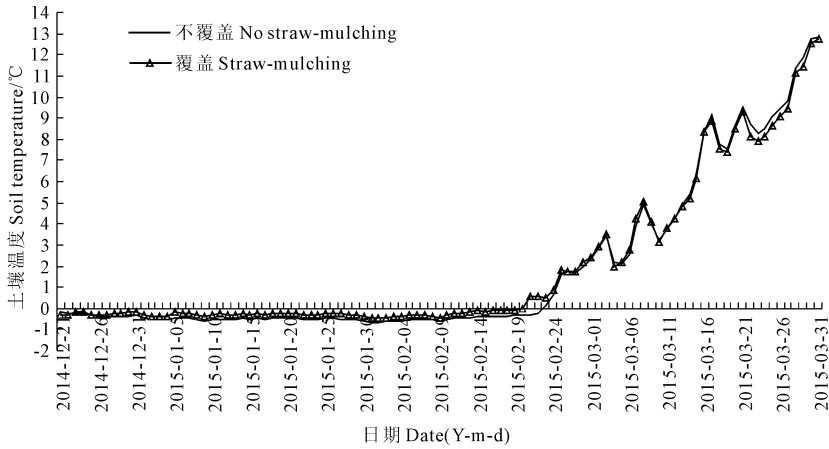


图 1 秸秆覆盖与不覆盖冬小麦拔节期前土壤 5 cm 温度(2014—2015 季)

Fig.1 Soil temperature of 5 cm depth under straw mulching and without before jointing stage of wheat (2014—2015)

2.2 不同处理对小麦、玉米叶面积指数的影响

两年的试验结果(图 2)表明,拔节前,各处理水分条件一致,而且由于冬季及早春温度较低,秸秆覆盖对小麦叶面积指数没有明显影响,各处理间无显著差异;拔节期,相对不灌溉处理,灌溉明显促进了小麦生长发育,而且开花期春季 1 水覆盖处理叶面积指数比春季 1 水不覆盖 2013—2014 生长季高 10.82%,2014—2015 生长季高 10.74%,说明在灌水条件下秸秆覆盖对这个阶段小麦生长发育也起到了促进作用。开花期~成熟期,随着气温的不断升高,由于秸秆覆盖的土壤温度回升较缓慢,在一定程度上限制了小麦植株生长,开花期后出现明显差异,花后 10 天春季 1 水覆盖处理的叶面积指数比春季 1 水不覆盖处理低 12.24% (2013—2014) 和 9.22%

(2014—2015),且差异显著;花后 20 天分别降低 9.12% (2013—2014) 和 11.48% (2014—2015),差异明显增大且显著。

玉米生长期间由于降水和灌溉较充足,两年的试验结果都表明,玉米叶面积指数各处理间没有显著差异。

2.3 不同处理对小麦、玉米群体地上部生物量的影响

图 3 为 2013—2015 年各处理地上部生物量。由图中可以看出,小麦拔节前,2013—2014 年小麦地上部生物量积累春季 1 水覆盖>春季 1 水>春季 0 水>春季 0 水覆盖,但差异不显著($P>0.05$);拔节期后,春季 1 水处理生物量明显高于春季 0 水处理,差异显著($P<0.05$),春季 1 水覆盖处理的生物量

最大,为 $17.19\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,生物量最小的为春季 0 水,为 $16.28\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。由此可知,在限水供应和空气温度较低条件下,秸秆覆盖起到了保温和保墒作用,与对叶面积指数的影响一致。

2014—2015 年拔节前生物量春季 1 水 > 春季 1 水覆盖 > 春季 0 水 > 春季 0 水覆盖,处理间差异不显著 ($P>0.05$);拔节期后,灌溉处理仍高于不灌溉处理,差异显著 ($P<0.05$)。不论秸秆覆盖与否,两年的结果都表明拔节期灌溉 1 水后,土壤中的水分

含量有所提升,较充足的水分促进了小麦生长发育,小麦生长旺盛;而春季不灌溉的处理,土壤水分含量较低,影响了小麦生长发育,致使生物量下降。

2014 和 2015 年玉米生长期由于进行了灌溉,因此地上部生物量各处理间没有显著差异 ($P>0.05$),降水和灌溉后,充足的土壤水分保证了玉米的正常生长发育,没有受到上茬小麦水分和秸秆覆盖处理的影响。

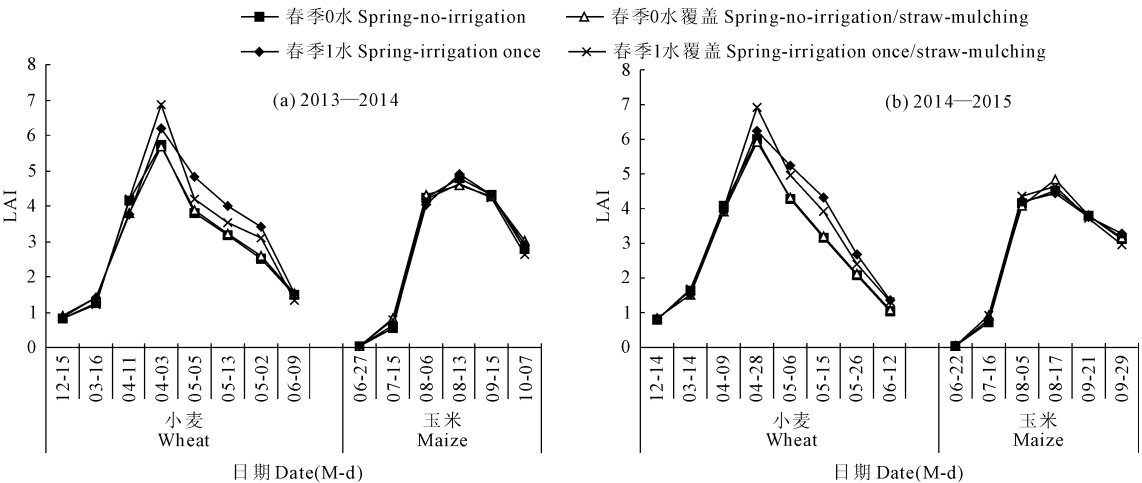


图 2 2013—2015 年小麦、玉米叶面积指数
Fig.2 LAI of wheat and maize from 2013 to 2015

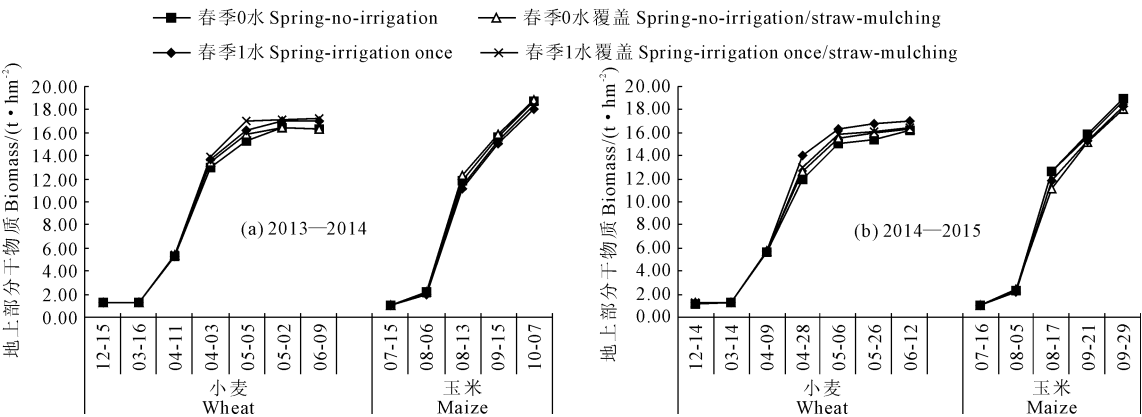


图 3 2013—2015 小麦、玉米地上部分生物量
Fig.3 The biomass of wheat and maize from 2013 to 2015

2.4 不同处理土壤水分动态变化

图 4、图 5 为不同处理小麦播前、拔节、收获及玉米收获后土壤 0~200 cm 体积含水量。两年的结果表明,小麦收获后,春季 0 水、0 水覆盖、春季 1 水和 1 水覆盖处理 0~120 cm 各土层含水量相对播前含水量下降明显,说明主要消耗了 0~120 cm 的土壤水分,而 120~200 cm 土层含水量变化较小。由此可见,0~120 cm 土层为土壤主要供水层。

从图 4 可以看出,2013—2014 年小麦拔节期,各土层土壤体积含水量秸秆覆盖的处理都高于不覆盖处理,春季 1 水覆盖比春季 1 水不覆盖 0~120 cm 土壤贮水量高 15 mm,春季 0 水覆盖比不覆盖高 11 mm,而且从返青到拔节期间的降水量仅为 0.1 mm,没有有效降水,说明覆盖后在一定程度上抑制了表层土壤水分的蒸发,起到了一定的保墒作用。小麦收获后,春季 0 水覆盖比不覆盖 0~120 cm 土壤贮

水量仍然高 15 mm,而拔节期灌溉 1 水后,土壤贮水明显提高,但覆盖比不覆盖的贮水量高 14 mm。玉米播种时及关键生长期进行了灌溉,但由于生长期间降水量为 157.3 mm,较常年偏少 47%,因此玉米收获后土壤贮水量依然偏低。但春季 0 水和 0 水覆盖比 1 水和 1 水覆盖处理 0~120 cm 含水量高 40~60 mm,0 水处理使得土壤在夏季降水较多的季节储存了较多的水分。

2014—2015 年小麦生长期间,从返青到拔节期的降水量为 25.60 mm,拔节期春季 0 水覆盖比不覆盖处理 0~120 cm 贮水量高 38 mm,且主要为 0~60

cm 土层含水量高于不覆盖处理;春季 1 水覆盖比不覆盖土壤贮水量高 23 mm,同样也说明了覆盖后对土壤水分的保墒效果。小麦收获后,覆盖后的土壤贮水仍高于不覆盖处理。玉米收获后,0~120 cm 贮水量为 334~352 mm,为小麦冬季生长提供了有效水分。但 0 水灌溉处理比 1 水处理含水量高 30 mm,在雨季储存了较多的降水,提高了对降水资源的有效利用。

2015 年玉米生长期间的降水量为 220.7 mm,比常年仍偏低 26%,但在此基础上进行了灌溉,保证了玉米正常生长发育和较高的产量。

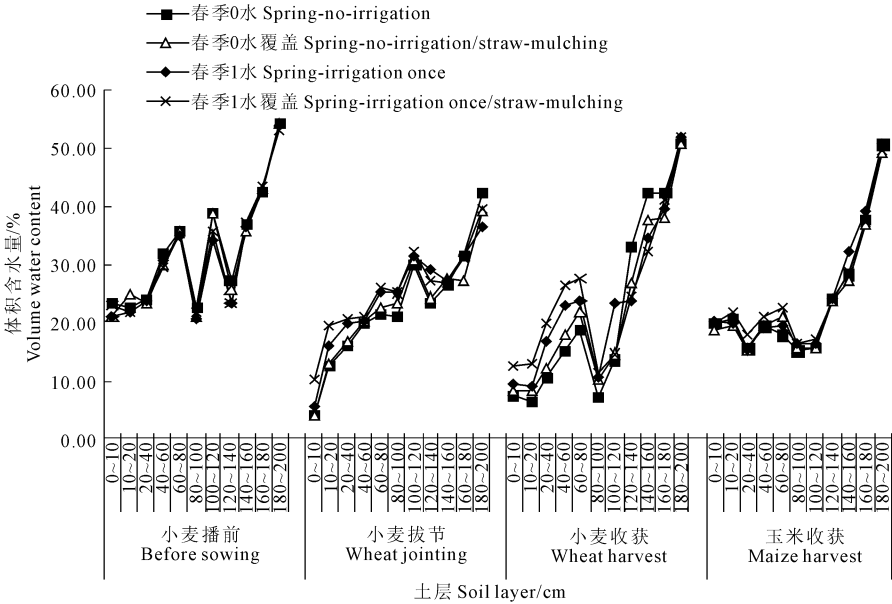


图 4 2013—2014 年小麦、玉米不同层次土壤体积含水量

Fig.4 Water content of wheat and maize of different soil layers from 2013 to 2014

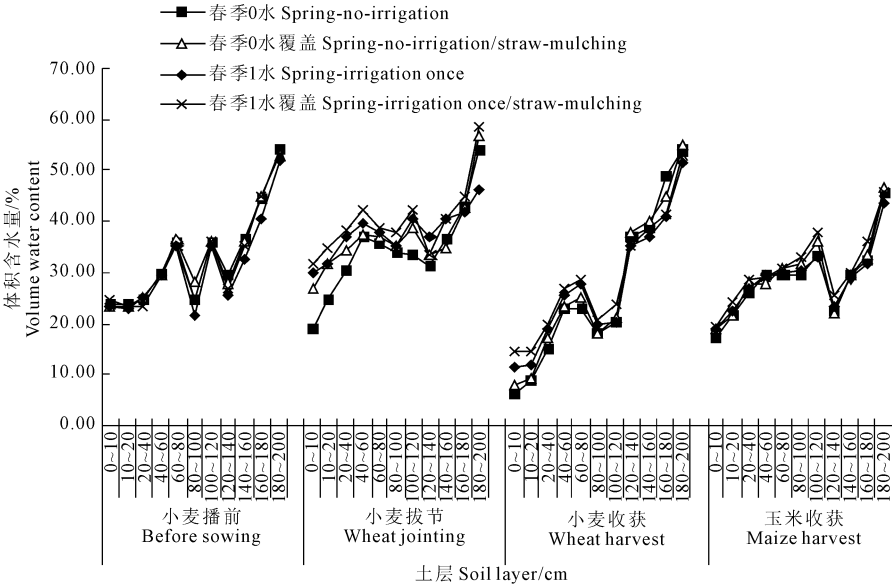


图 5 2014—2015 年小麦、玉米不同层次土壤体积含水量

Fig.5 Water content of wheat and maize a of different soil layers from 2014 to 2015

2.5 不同处理对小麦、玉米产量及水分利用效率的影响

表 2 为不同处理和不同年份小麦、玉米产量及产量构成要素。2013—2014 年,秸秆覆盖后小麦产量低于不覆盖产量,但没有显著差异。和不覆盖相比,春季 0 水覆盖产量降低了 1.46%,春季 1 水处理覆盖后降低了 2.76%;2015 年春季 0 水覆盖降低了 2.78%,春季 1 水覆盖降低了 1.11%。根据产量构成因素,秸秆覆盖后有效穗数降低,使得同一水分处理覆盖后比不覆盖产量有所降低。在不同水分条件下,春季灌溉 1 水后,对小麦产量形成起到了关键作用,2014 年产量差异显著,2015 年差异不显著(表 2)。

2013—2015 年都属于少雨年份,为保证玉米正常生长发育,在玉米生育期间进行了灌溉。从玉米产量和产量构成因素分析,两年中各处理间没有显著差异,小麦生长期间的水分和覆盖处理对下茬玉米生长发育和产量没有显著影响。

水分利用效率是衡量水分高效利用的标准,从作物所消耗的降水量、灌溉量和土壤水分析,小麦生长季所有处理中无覆盖处理消耗的土壤水最多(表 3)。随着灌溉水量的增加,土壤耗水量减少,两年中

小麦生长季土壤耗水量都表现为春季 0 水大于春季 1 水,且差异显著;相同水分条件下不覆盖大于覆盖处理,但差异不显著。这种差异也对玉米生长期间土壤耗水量产生了一定的影响,2014 和 2015 年夏玉米春季 0 水处理的不覆盖比覆盖分别多耗水 3.4 mm 和 5.2 mm,春季 1 水处理多耗水 9.0 mm 和 10.7 mm。因此,由于小麦收获后土壤水分含量的差异及玉米生长期间的降水量不同,共同影响了玉米生长期间土壤耗水量的差异。从水分利用效率看,小麦、玉米和周年土壤水分利用效率各处理间和年份间都没有显著差异。但灌溉 1 水后,水分利用效率都有所降低,2015 年尤其明显。

3 讨 论

海河平原粮食生产水资源在严重短缺情形下,减少土壤无效蒸发对本区域农田节水具有重要意义。本研究结果表明,在保证底墒前提下,小麦生长期不灌溉时仍可获得最低 7 359.5 kg·hm⁻²的产量,但秸秆覆盖后产量低于不覆盖处理,与已有的在旱地条件下秸秆覆盖比不覆盖提高作物产量 10%~15%^[28-29],干旱年份可增产 50%^[30-31]的研究结

表 2 不同处理作物产量及产量构成因素
Table 2 Grain yield and yield components of different treatments

年份 Year	处理 Treatment	小麦 Wheat				玉米 Maize			
		有效穗数	穗粒数	千粒重	产量	有效穗数	穗粒数	百粒重	产量
		Spike number /(万个·hm ⁻²)	Grains number /粒	1000 kernel weight /g	Grain yield /(kg·hm ⁻²)	Spike number /(万个·hm ⁻²)	Grains number /粒	100 kernel weight /g	Grain yield /(kg·hm ⁻²)
2013—2014	春季 0 水 Spring-no-irrigation	765.4	31.5	41.4	7771.8b	6.5	529.3	30.4	11381.0a
	春季 0 水覆盖 Spring-no-irrigation/straw- mulching	668.3	31.0	41.0	7658.0b	6.4	510.3	31.3	11745.7a
	春季 1 水 Spring-irrigation once	762.4	34.4	37.4	8401.8a	6.5	542.7	32.6	11279.1a
	春季 1 水覆盖 Spring-irrigation once/straw- mulching	743.5	33.6	36.5	8170.0a	6.6	550.4	31.6	11590.4a
2014—2015	春季 0 水 Spring-no-irrigation	703.0	33.5	39.0	7570.1a	5.9	572.7	31.6	10300.4a
	春季 0 水覆盖 Spring-no-irrigation/straw- mulching	660.9	33.1	40.8	7359.5a	6.0	516.2	31.4	10205.5a
	春季 1 水 Spring-irrigation once	754.6	31.5	39.0	7756.3a	5.5	546.6	32.2	10169.9a
	春季 1 水覆盖 Spring-irrigation once/straw- mulching	693.4	31.5	41.6	7670.4a	6.1	552.4	30.4	10148.9a

注:在同一试验中,每一列数据后不同字母表示处理间在 0.05 水平上显著差异。下同。
Note: In each experiment, values followed by different letter within a column are significantly at $P < 0.05$. The same as below.

表 3 不同水处理的秸秆覆盖与不覆盖的耗水量与水分利用效率

Table 3 Water consumption and water use efficiency with straw mulching and without under different irrigations

年份 Year	处理 Trentment	小麦 Wheat				玉米 Maize				周年水分 利用效率 Annual water use efficiency
		降雨量 Rainfall /mm	灌溉量 Irrigation /mm	土壤耗 水量 Soli water consumption /mm	水分利 用效率 Water use efficiency (kg·mm ⁻¹ , hm ⁻²)	降雨量 Rainfall /mm	灌溉量 Irrigation /mm	土壤耗 水量 Soli water consumption /mm	水分利 用效率 Water use efficiency (kg·mm ⁻¹ , hm ⁻²)	
2013— 2014	春季 0 水 Spring-no-irrigation	126.3	70	192.8a	20.0a	157.3	180.0	− 6.09c	34.4a	26.6a
	春季 0 水覆盖 Spring-no-irrigation/straw- mulching	126.3	70	184.1a	20.1a	157.3	180.0	− 9.52d	35.8a	27.4a
	春季 1 水 Spring-irrigation once	126.3	140	133.7b	20.8a	157.3	180.0	6.92b	32.8a	26.4a
	春季 1 水覆盖 Spring-irrigation once/straw- mulching	126.3	140	124.8b	21.2a	157.3	180.0	15.92a	32.8a	26.6a
2014— 2015	春季 0 水 Spring-no-irrigation	124.5	70	108.5a	25.0a	220.7	180.0	− 24.40b	27.4a	26.3a
	春季 0 水覆盖 Spring-no-irrigation/straw- mulching	124.5	70	99.2a	25.1a	220.7	180.0	− 29.55c	27.5a	26.4a
	春季 1 水 Spring-irrigation once	124.5	140	65.0b	23.5b	220.7	180.0	− 20.27a	26.7a	25.3a
	春季 1 水覆盖 Spring-irrigation once/straw- mulching	124.5	140	59.3b	23.7b	220.7	180.0	− 30.96c	27.5a	25.7a

果不同,但与在华北平原玉米秸秆覆盖冬小麦后,小麦产量有所减产^[20,32-36]的结论一致。减产的原因与秸秆覆盖后,土壤温度的日较差较小^[37-39],根区温度白天低,晚上高,在一定程度上影响了根系吸收水分和养分,以及晚上加大了呼吸消化^[40-43],对植物吸收水分和养分具有明显的影响作用^[44],所以秸秆覆盖后小麦根区温度变化可能是造成小麦减产的主要因素^[21],表现在生长发育上推迟了小麦春季返青、拔节、灌浆的时间,使得灌浆的时间变短,导致向籽粒分配的光合产物减少,造成产量降低^[45]。因此,今后应加强秸秆覆盖后小麦根区温度和吸收水分、养分及代谢等生理生态过程的机理机制研究,降低秸秆覆盖对产量形成的负面效应^[21],为提高产量和水分利用效率提供更科学的决策依据。

秸秆覆盖后对土壤水分的效应为减少土壤水分蒸发,提高水分利用效率^[46],华北平原玉米生产中采用小麦秸秆覆盖后可减少生育期耗水 40 mm,水分利用效率和产量增加 7%~10%^[4,47-48],但玉米秸秆覆盖冬小麦后,虽然在一定程度上抑制了土壤水分蒸发,但水分利用效率并没有增加^[20,32-36]。本研究结果表明,秸秆覆盖有效地减少了冬小麦整个生育期间的土壤耗水量,2014 年 0~120 cm 土壤中,

小麦收获时的土壤贮水量春季 0 水处理,覆盖比不覆盖土壤贮水量增加 15 mm,春季 1 水处理覆盖比不覆盖增加 14 mm,2015 年也具有相同的趋势。

玉米生长期两年间都进行了正常补灌,但由于小麦不同处理收获时土壤水分的差异,导致了玉米生长期土壤水分的差异。2014 年玉米收获时,小麦春季 0 水和 0 水覆盖处理 0~120 cm 土层含水量比小麦春季 1 水和 1 水覆盖处理高 40~60 mm;2015 年高 30 mm;但水分处理相同条件下,覆盖与不覆盖间没有明显差异,这也为秸秆覆盖和水分管理相结合条件下如何提高周年土壤水分利用效率提供了科学依据。

根据研究区域小麦、玉米生育期间多年平均降水量,小麦生长期平均 228.1 mm,玉米生长期平均 297.6 mm(根据当地 50 年降水资料计算),试验期间的降水偏少(表 1),并且 2014 年小麦拔节至开花灌浆期间,遭遇了低温寡照,再加上合适的降水分布,千粒重较常年偏高,因此产量较高,而 2015 年基本接近于常年水平。2014 年不同水分处理间小麦产量差异显著,而 2015 年差异不显著,可能与拔节期以后,小麦生育期间的降水增多,出现了超补偿效应^[49-50],使本来处在缺水状态的 0 水处理有效的

利用了土壤储存的降水,提高了降水的有效利用。因此,由于不同降水和温度年型,秸秆覆盖小麦后表现出了不同的产量效应和土壤水分含量的差异。

另外,本研究是针对海河平原小麦-玉米生产系统进行的研究,在以后的研究中还应加强秸秆覆盖小麦后不同降水和温度年型条件下影响产量和水分利用效率的相关机理和机制研究,以及秸秆覆盖玉米的田间效应,为本区域实现小麦-玉米种植制度秸秆覆盖节水增产提供科学技术依据。

4 结 论

研究结果表明,秸秆覆盖导致拔节期后土壤温度回升缓慢,小麦地上部植株生长相对减缓,叶面积指数和地上部生物量积累减少。覆盖后有效穗数减少,两年间覆盖产量都低于不覆盖处理,但差异不显著;2014 年春季灌溉与不灌溉处理间产量差异显著,而 2015 年差异不显著。春季无论灌溉与否,秸秆覆盖在一定程度上降低了表层土壤水分蒸发,有一定的保墒效果。在水分有限条件下,小麦于需水敏感期进行灌溉可显著提高产量,而结合秸秆覆盖后,产量降低不显著,但耗水量减少。因此,春季灌溉 1 水结合秸秆覆盖是本区域降低小麦耗水量、保证产量的有效措施。

参 考 文 献:

[1] 张光辉,费宇红,王金哲,等.华北灌溉农业与地下水适应性研究[M].北京:科学出版社,2012.

[2] 韩占江,于振文,王 东,等.测墒补灌对冬小麦干物质积累与分配及水分利用效率的影响[J].作物学报,2010,36(3):457-465.

[3] 刘昌明,张喜英,由懋正.大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究[J].水利学报,1998,29(10):36-39.

[4] 张喜英,陈素英,裴 冬,等.秸秆覆盖下的夏玉米蒸散、水分利用效率和作物系数的变化[J].地理科学进展,2002,21(6):583-592.

[5] 陈萌山.把加快发展节水农业作为建设现代农业的重大战略举措[J].农业经济问题,2011,(2):4-7.

[6] Zhang H, Oweis T Y. Water yield relations and optima irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region[J]. Agricultural Water Management, 1999,38:195-211.

[7] 路振广,路金镶.大田作物非充分灌溉实施效果分析评价[J].灌溉排水学报,2007,26(5):30-33.

[8] 黄 明,吴金芝,李友军,等.不同耕作方式对旱作区冬小麦生产和产量的影响[J].农业工程学报,2009,25(1):50-54.

[9] 仲 爽,李严坤,任 安,等.不同水肥组合对玉米产量与耗水量的影响[J].东北农业大学学报,2009,40(2):44-47.

[10] 郭步庆,陶宏斌.华北平原不同粮作模式下作物水分利用[J].中国农业大学学报,2013,18(1):53-60.

[11] 卜玉山,苗果园,周乃键,等.地膜与秸秆覆盖土壤肥力效应分析与比较[J].中国农业科学,2006,39(5):1069-1075.

[12] 宋淑亚,刘文兆,王 俊,等.覆盖方式对玉米农田土壤水分、作物产量及水分利用效率的影响[J].水土保持研究,2012,19(2):210-217.

[13] Chen Yanlong, Liu Ting, Tian Xiaohong, et al. Effects of plastic film combined with straw mulch on grain yield and water use efficiency of winter wheat in Loess Plateau[J]. Field Crops Research, 2015, 172:53-58.

[14] 李梦哲,张维宏,张永升,等.不同水分管理下全田土下微膜覆盖的冬小麦耗水特性[J].中国农业科学,2013,26(43):4893-4904.

[15] P. A. J. van Oort, Wang G, Vos J. et al. Towards groundwater neutral cropping systems in the Alluvial Fans of the North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2016,165:131-140.

[16] 孟 毅,蔡焕杰,王 建,等.麦秆覆盖对夏玉米的生长及水分利用的生长[J].西北农林科技大学学报,2005,33(6):131-135.

[17] 李玉鹏,贾志宽,杨保平,等.秸秆覆盖量对半干旱区旱作春玉米生长及水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2010,29(1):117-120.

[18] 高 飞,贾志宽,韩清芳,等.秸秆覆盖量对土壤水分利用及春玉米产量的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):104-112.

[19] Mellou li H J, Van Wesem ae l B, Poesen J, et al. Evaporation losses from bare soils as in fleneed by cultivation techniques in semi-arid regions[J]. Agricultural Water Management, 2000,42(3):355-369.

[20] 高亚军,李生秀.旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J].农业工程学报,2005,21(7):15-19.

[21] 陈素英,张喜英,孙宏勇,等.华北平原秸秆覆盖冬小麦减产原因分析[J].中国生态农业学报,2013,21(5):519-525.

[22] 左宝余,逢焕成,李玉义,等.鲁北地区秸秆覆盖对冬小麦需水量、作物系数及水分利用效率的影响[J].水利与建筑工程学报,2010,8(3):12-15.

[23] 解文艳,樊贵盛,周怀平,等.秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2011,42(11):60-67.

[24] 陈素英,张喜英,裴 冬,等.玉米秸秆覆盖对土壤温度和土壤蒸发的影响[J].农业工程学报,2005,21(10):171-173.

[25] 陈素英,张喜英,刘孟雨.玉米秸秆覆盖麦田下的土壤温度和土壤水分动态规律[J].中国农业气象,2002,23(4):34-37.

[26] 侯贤清,李 荣,韩清芳,等.夏闲期不同耕作模式对土壤蓄水保墒效果及作物水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2012,23(3):94-100.

[27] 路文涛,贾志宽,高 飞,等.秸秆还田对宁南旱作农田土壤水分及作物生产力的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(1):93-99.

[28] 李富宽,姜慧新.秸秆覆盖的作用与机理[J].当代畜牧,2003(6):38-40.

[29] 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[J].干旱地区农业研究,2003,21(3):69-73.

[30] 赵聚宝,徐祝龄.中国北方旱地农田水分开发利用[M].北京:中国农业出版社,1996.

[31] 逢焕成.秸秆覆盖对土壤环境及冬小麦产量状况的影响[J].土壤通报,1999,30(4):174-175.

[32] Chen Suying, Zhang Xiying, Pei Dong, et al. Effects of straw mulchingon soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: Field experiments on the North China Plain[J]. Ann Appl Biol, 2007,150(3):261-268.

[33] Ram H, Singh Y, Saini K S, et al. Areonomic and economicvalu-

- ation of permanent raised beds, no tillage and strawmulching for an irrigated maize-wheat system in Northwest India [J]. *Expl Agric*, 2012, 48(1):21-38.
- [34] 李全起,陈雨海,吴巍,等.秸秆覆盖和灌溉对冬小麦农田光能利用率的影响[J].*应用生态学报*, 2006, 17(2):243-246.
- [35] 李素娟,李琳,陈阜,等.保护性耕作对华北平原冬小麦水分利用的影响[J].*华北农学报*, 2007, 22(S1):115-120.
- [36] 刘婷,贾志宽,张睿,等.秸秆覆盖对旱地土壤水分及冬小麦水分利用效率的影响[J].*西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(7):68-76.
- [37] Dahiya R, ngwersen J, Streck T. The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: Experimental findings and modeling[J]. *Soil Tillage Res*, 2007, 96(1/2):52-63.
- [38] Sarkar S, Paramanick M, Goswami S. Soil temperature, water use and yield of yellow sarson (*brassica napus* L. Var. *Glauca*) in relation to tillage intensity and mulch management underrainfed lowland ecosystem in eastern India[J]. *Soil and Till - age Research*, 2007, 93(1):94-101.
- [39] 刘炜,高亚军,杨君林,等.旱地冬小麦返青前秸秆覆盖的土壤温度效应[J].*干旱地区农业研究*, 2007, 2(4):197-201.
- [40] Martinez F, Lazo Y O, Fernandez-Galiano J M, et al. Root respiration and associated costs in deciduous and evergreen species of *Quercus*[J]. *Plant Cell Environ*, 2002, 25(10):1271-1278.
- [41] Peng S B, Huang J L, Sheehy J E, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming[J]. *Proc Natl Acad Sci*, 2004, 10(27):9971-9975.
- [42] Leea S H, Adya P S, Gap C C, et al. Exposure of roots of cucumber (*Cucumis sativus*) to low temperature severely reduces root pressure, hydraulic conductivity and active transport of nutrients[J]. *Physiologia Plantarum*, 2004, 120(3):413-420.
- [43] Burton A J, Melillo J M, Frey S D. Adjustment of forest ecosystem root respiration as temperature warms[J]. *J Int Plant Biol*, 2008, 50(11):1467-1483.
- [44] Walker J M. One degree increments in soil temperatures affect maize seedling behavior[J]. *Pro Soc Soil Sci Am*, 1969, 33(5):729-736.
- [45] 高丽娜,陈素英,张喜英,等.华北平原冬小麦麦田覆盖对土壤温度和生育进程的影响[J].*干旱地区农业研究*, 2009, 27(1):107-114.
- [46] 张俊鹏,刘组贵,孙景升,等.不同水分和覆盖处理对冬小麦生长及水分利用的影响[J].*灌溉排水学报*, 2015, 34(8):7-11.
- [47] 张海林,陈阜,秦耀东,等.覆盖免耕夏玉米耗水特性的研究[J].*农业工程学报*, 2002, 18(2):36-40.
- [48] 陈素英,张喜英,裴冬,等.秸秆覆盖对夏玉米田棵间蒸发和土壤温度的影响[J].*灌溉排水学报*, 2004, 23(4):32-36.
- [49] Besky A J. Does herbivory benefit plants? A review of the evidence[J]. *Am Nat*, 1986, 127(6):870-892.
- [50] Gajri P R, Prihar S S. Effect of small irrigation amounts on the yield of wheat[J]. *Agric Water Manag*, 1983, 6(1):31-41.

(上接第 7 页)

- [4] P M 哈里斯.马铃薯改良的科学基础[M].北京:农业出版社, 1984:155-185.
- [5] 2015 年云南省统计年鉴[M].北京:中国农业出版社, 2011.
- [6] 孔令郁,彭启双,熊艳,等.平衡施肥对马铃薯产量及品质的影响[J].*土壤肥料*, 2004, (3):17-19.
- [7] 陈洪,张新明,全锋,等.氮磷钾不同配比对冬作马铃薯产量、效益和肥料利用率的影响[J].*中国马铃薯*, 2010, 24(4):224-229.
- [8] 王国兴,徐福利,王渭玲,等.氮磷钾及有机肥对马铃薯生长发育和干物质积累的影响[J].*干旱地区农业研究*, 2013, 31(3):106-111.
- [9] 赵欢,药久兰,何佳芳,等.钾肥对马铃薯干物质积累、钾素吸收及利用效率的影响[J].*西南农业学报*, 2015, 28(2):644-649.
- [10] 张东昱,王多成,张荣,等.钾肥对鲜食型马铃薯产量及品质的影响[J].*中国马铃薯*, 2009, 23(3):152-154.
- [11] 殷文,孙春明,马晓燕,等.钾肥不同用量对马铃薯产量及品质的效应[J].*土壤肥料*, 2005, (4):44-47.
- [12] 药久兰,孙锐锋,袁玲.马铃薯钾素营养研究进展[J].*贵州农业科学*, 2009, 37(9):54-56.
- [13] 弓钦,樊明寿.马铃薯测土配方施肥技术[M].北京:中国农业出版社, 2011.
- [14] 穆俊祥,曹兴明,马建国.氮磷钾和有机肥配合施用对马铃薯淀粉含量和产量的影响[J].*土壤*, 2009, 41(5):844-848.
- [15] Westermann D T, Tindall T A. Potassium diagnostic criteria for potato plants[J]. *Better Crop*, 2000, 84(3):6-8.
- [16] 康文钦,石晓华,敖孟奇,等.马铃薯的钾素需求及营养诊断[J].*中国土壤与肥料*, 2013, (2):1-4.
- [17] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社, 2000:127-129, 146-149, 302-311.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析(第三版)[M].北京:中国农业出版社, 2005.
- [19] 劳家桢.土壤农化分析手册[M].北京:农业出版社, 1988.
- [20] 刘润梅,范茂攀,付云章,等.云南省马铃薯施肥量与化肥偏生产力的关系研究[J].*土壤学报*, 2014, 51(4):753-760.
- [21] 段玉,张君,王博,等.钾肥品种和施肥时期对马铃薯产量和品质的影响[J].*北方农业学报*, 2016, 44(2):1-6.
- [22] 蒋富友,杨永泉.不同时期施用钾肥对脱毒马铃薯产量的影响[J].*中国马铃薯*, 2006, 20(5):280-281.
- [23] 张琼,屠年忠,董云忠.马铃薯不同生育时期追施钾肥增产效果分析[J].*云南农业*, 2009, (2):32-33.
- [24] 郭志平.马铃薯不同生育期追施钾肥增产效果的研究[J].*土壤肥料*, 2002, (3):15-20.
- [25] 魏红,孙国梁,李霞,等.钾肥不同施用次数对马铃薯农艺性状及产量的影响[J].*内蒙古农业科技*, 2015, 43(6):41-42.
- [26] 朱青,王兆鸾,陈正刚,等.中国西南地区坡地钾素平衡及管理措施探讨[J].*中国植物营养与肥料学报*, 2006, 12(6):772-777.
- [27] 袁东海,王兆鸾,郭新波,等.红壤小流域不同利用方式土壤钾素流失特征研究[J].*水土保持通报*, 2003, 23(3):16-20.
- [28] 刘建香,贾秋鸿,田树,等.不同农艺措施对云南红壤坡耕地钾素平衡和流失的影响[J].*西南农业学报*, 2009, 22(4):1006-1010.