

秸秆覆盖对沟灌水盐迁移与玉米水分利用效率的影响

范雷雷¹ 史海滨¹ 李瑞平¹ 苗庆丰¹ 王思楠¹ 裴文武²

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古河套灌区管理总局, 巴彦淖尔 015000)

摘要: 为研究河套灌区盐渍化土壤垄背地膜和秸秆覆盖下的沟灌土壤水盐迁移特征,明晰沟灌作物产量及水分利用效率的变化规律,设置垄背秸秆覆盖量分别为 0.3 (P0.3)、0.6 (P0.6)、0.9 (P0.9)、1.2 kg/m² (P1.2) 和常规覆膜 (DM)、裸地不覆盖 (CK) 6 种处理,于 2019 年进行沟灌灌水试验,对比分析了不同秸秆覆盖量下玉米生育期前后沟断面土壤水盐分布、作物产量及水分利用效率的变化情况。结果表明:玉米苗期,覆膜和秸秆覆盖处理能显著降低作物无效耗水,保证生育后期对水分的需求;抽雄灌浆期,覆膜增温效应促进了作物生长,DM 处理玉米耗水强烈,土壤储水量最低;玉米成熟期,垂直方向土壤水分运动较前期减弱。整体来看,P1.2、P0.9 处理蓄水保墒效果较好 ($P < 0.05$)。沟灌灌水定额较小、盐分淋洗效果较差,且受土壤蒸发及地下水补给作用,因此造成根系层盐分累积。覆膜和秸秆覆盖处理均能有效抑制盐分聚集,P1.2 和 P0.9 处理生育末期的土壤含盐量较初始含盐量增幅较小,分别为 14.10% 和 24.74%。P0.9 和 DM 处理产量和水分利用效率较 CK 分别提高 20.01%、25.46% 和 11.32%、15.29%,增幅较大;过量秸秆覆盖造成播期土壤温度偏低,会影响玉米出苗,P1.2 处理玉米产量和水分利用效率较 DM 处理略有降低,但差异不显著 ($P > 0.05$)。采用主成分分析法对沟灌秸秆覆盖下土壤保墒抑盐效果、玉米出苗、产量以及水分利用效率等因素进行综合评价,初步确定适宜的沟灌秸秆覆盖模式,建议采用 0.9~1.2 kg/m² 的垄背秸秆覆盖量代替常规地膜覆盖,以减小地膜残留带来的环境污染。本研究可为灌区农业栽培提供一定借鉴。

关键词: 玉米; 秸秆覆盖; 沟灌; 土壤水盐; 水分利用效率; 主成分分析

中图分类号: S275.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)02-0283-11 OSID: 

Effects of Straw Mulching on Soil Water-salt Transportation and Water Use Efficiency of Maize under Furrow Irrigation

FAN Leilei¹ SHI Haibin¹ LI Ruiping¹ MIAO Qingfeng¹ WANG Sinan¹ PEI Wenwu²

(1. College of Water Conservation and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China
2. Inner Mongolia Hetao Irrigation District General Administration, Bayannur 015000, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of water and salt migration of the ridge-back plastic film and straw mulch on the ditch section of the typical saline soil in Hetao Irrigation District, and clarify the changes in crop yield and water use efficiency, the field experiment was carried out in 2019 with ridge-back stalks (0.3 kg/m², 0.6 kg/m², 0.9 kg/m² and 1.2 kg/m², recorded as P0.3, P0.6, P0.9 and P1.2) and the plastic mulching (DM) and bare land (CK) furrow irrigation test, the comparison and analysis of different straw coverages on the changes of soil water and salt distribution, crop yield and water use efficiency in the ditch section before and after maize growth period were made. Results showed that before maize jointing, film mulching and straw mulching can significantly reduce the ineffective water consumption of crops and ensure the water demand in the later growth period. During the heading grouting period, the temperature increase effect of film mulching promoted the growth of crops, which made treatment DM of maize intensive water consumption and the lowest soil water storage. The soil water movement in the vertical direction at the end of growth was weaker than that in the previous period. In general, the treatments of P1.2 and P0.9 was better than CK in water storage and moisture retention ($P < 0.05$). Due to the small quota of furrow irrigation, the salt leaching effect was poor, and it was

收稿日期: 2020-05-19 修回日期: 2020-06-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400205)、国家自然科学基金项目(51769021、51539005、51839006)和内蒙古自治区科技计划项目(201602049)

作者简介: 范雷雷(1993—),男,博士生,主要从事节水灌溉技术研究,E-mail: 624775767@qq.com

通信作者: 史海滨(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: shi_haibin@sohu.com

affected by soil evaporation and groundwater replenishment, resulting in accumulation of salt in the root layer. Both plastic and straw mulching can effectively inhibit the accumulation of salt, and the salt content of the soil treated with P1.2 and P0.9 was increased the least than the initial soil salt, only 14.10% and 24.74%. The yield and water use efficiency of P0.9 and DM treatment was increased the largest, compared with CK, it was increased by 20.01%, 25.46% and 11.32%, 15.29%, respectively. Excessive straw mulch would cause low soil temperature during sowing period, reduce maize emergence, make maize yield and water use efficiency of P1.2 treatment slightly reduced compared with DM treatment, but the difference was not significant ($P > 0.05$). The principal component analysis method was used to comprehensively evaluate the effects of soil moisture retention and salt suppression, maize emergence, yield, and water use efficiency under furrow irrigation straw cover, and it was recommended to use $0.9 \sim 1.2 \text{ kg/m}^2$ of ridge-back straw coverage instead of conventional plastic film to reduce the environmental impact of plastic film residues. The research result can provide some reference for agricultural cultivation techniques in irrigation areas.

Key words: maize; straw cover; furrow irrigation; soil water-salt; water use efficiency; principal component analysis

0 引言

进入 21 世纪以来,加快传统资源消耗型农业向技术效益型转化、实现资源高效利用已成为农业生产中面临的主要问题^[1]。近年来,河套灌区总引水量逐年减少,农业水资源供需矛盾日益突出^[2],如何缓解灌区用水矛盾、提高农作物产量、增加农民收入成为目前重要问题之一^[3-6]。灌区农民节水意识较差,常年采用“大水漫灌”的灌水方式,在浪费水资源的同时还造成地下水位上升、土壤盐渍化加剧^[7]。沟灌是一种常见的地面灌溉方式,与微灌、喷灌等压力灌溉相比,具有设施简单、实施方便、经济成本较低等优点^[8-9],并且沟灌灌水后不会破坏作物根系附近的土壤结构,能够保持根部土壤疏松,增加土壤通气性,同时可抑制土壤表面板结、减少深层渗漏、防止地下水位升高和土壤养分淋失等^[10-12]。在多雨季节,还可利用灌水沟汇集地表径流,减少株间土壤蒸发,增加土壤墒情^[13-14]。

地膜覆盖作为一种成熟的农业栽培技术,在灌区得到广泛应用^[15]。传统沟灌种植模式的覆膜过程相对复杂,且常规地膜极易破损,破碎地膜与秸秆残渣等混合在土壤中不易分解,土壤中残膜含量逐年增多,农田水土环境不断恶化,直接影响土壤水肥利用效率及作物产量^[16-19]。因此探寻一种新的沟灌地表覆盖技术对于改善灌区土壤生态环境具有重要意义。

研究发现,秸秆覆盖作为一种常见的保护性耕作措施,能显著降低无效水分蒸发,调节土壤水、肥、气、热分布,提高作物产量和水分利用效率^[20-23]。并且,翌年秸秆还田后可增加土壤腐殖质、增强土壤肥力,是作物秸秆高效利用的主要方式之一^[24]。本研究于 2019 年进行垄背秸秆覆盖、常规覆膜及裸

地不覆盖的沟灌灌水试验,对比分析不同秸秆覆盖量下玉米生育期前后沟断面土壤水盐分布、作物产量以及水分利用效率的变化情况,采用主成分分析法对沟灌秸秆覆盖下土壤保墒抑盐效果、作物产量以及水分利用效率等因素进行综合评价,提出灌区适宜沟灌种植模式下的秸秆覆盖量,以期改善灌区土壤水土环境、减少地膜残留带来的白色污染。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在河套灌区巴彦淖尔市临河区双河镇进步村农业综合节水示范区内进行,属中温带大陆性季风气候,昼夜温差大,热量丰富,光照充足,无霜期短,四季分明。该地区年平均降水量仅 188 mm,年平均蒸发量却高达 2 032 ~ 3 179 mm,普遍为降水量的 10 ~ 30 倍。示范区土壤主要以粉砂壤土为主,平均容重为 1.51 g/cm^3 ,属轻中度盐渍化地区。

地下水埋深是造成土壤积盐的主要因素^[25],河套灌区由于排水系统不完善,多余的农田灌溉水不能及时排出,导致地下水位长期处于较高水平,受蒸发蒸腾作用影响,地表始终聚集大量盐分,造成土壤盐渍化^[26]。盐分的长期聚集会严重影响作物生长及产量,因此掌握作物生育期内地下水埋深变化规律对于分析根系土壤水盐动态变化及指导灌区农业灌溉具有重要现实意义。图 1 为试验区 2019 年监测所得降雨和地下水位数据,试验区玉米播种至收获期的整个作物生育期内累计降雨量为 108 mm,平均地下水位为 1.51 m。3 月末由于土壤消融,地下水水位上升,而到 5 月初(玉米播种期),此时可能由于地下水上升带来的返盐影响,玉米出苗受到抑制。进入灌溉季节后,受到灌溉水及降雨补给作用影响,

地下水水位会急剧上升,而后随着每次灌水前后灌溉水的补给,地下水埋深呈动态变化。随着灌溉季

节的结束,受土壤蒸发、作物耗水等影响,地下水水位呈下降趋势。

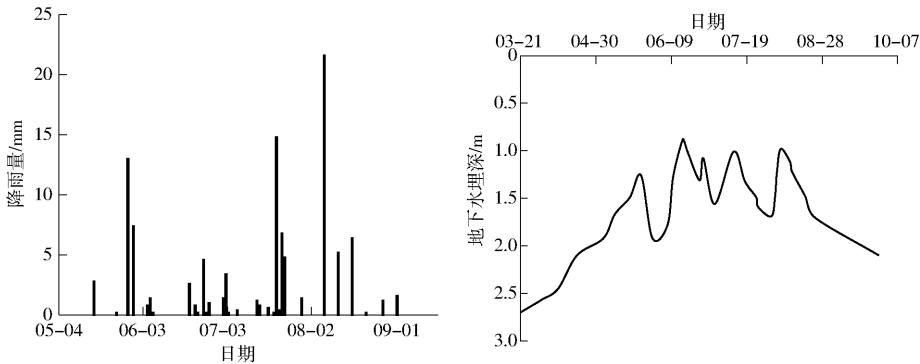


图1 试验区降雨量及地下水埋深变化情况

Fig.1 Precipitation and groundwater depth changes in experiment area

1.2 试验设计

试验设计沟灌裸地不覆盖对照(CK)、常规覆膜(DM)以及垄背秸秆覆盖(秸秆覆盖量分别为0.3、0.6、0.9、1.2 kg/m²,记为P0.3、P0.6、P0.9、P1.2)共6种处理,3个重复,共计18条灌水沟,沟长均为50 m,每个处理之间由田埂隔开。种植作物为玉米(钧凯918),全生育期130 d左右,玉米4月27日播种,采用一垄两行种植方式,行距和株距分别为40、28 cm,人工种植深度2.5 cm。玉米播种时施底肥(磷酸二铵和尿素按照4:1混合)450 kg/hm²,第1次灌水时追加尿素450 kg/hm²,其他灌水轮次均不施肥,9月24日收获。作物生育期共灌水4次,每次灌水定额45 mm,其他田间管理按当地农民常规做法进行。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤含水率及含盐量

每隔10 d分别在沟首、中、尾位置处采用干燥法测定垄背及沟底0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm土壤含水率,灌水及降雨前后加测,土壤储水量计算式为^[27]

$$W = \sum_{i=1}^n \gamma_i d_i \theta_i / 10 \tag{1}$$

式中 W——土壤储水量,mm

γ_i ——第*i*层土壤容重,g/cm³

d_i ——第*i*层土层厚度,cm

θ_i ——第*i*层土壤质量含水率, %

采用 DDS-308A 型电导率仪测定各土层土壤电导率 EC,取样点位置同含水率测定位置,3次重复,并以 EC 表征各土层土壤含盐量^[28],计算式为

$$Q = 3.471EC + 0.015 \tag{2}$$

式中 Q——土壤全盐含量,g/kg

EC——土壤 1:5 浸提液 25℃ 时电导率,mS/cm

1.3.2 玉米产量及水分利用效率

玉米收获时每个处理连续取 20 株玉米测定产量、穗长、百粒质量、行粒数等指标(105℃杀青 2 h,而后在 80℃条件下干燥至质量恒定)。作物水分利用效率是表征作物对水分利用程度的重要指标,采用水量平衡法计算作物生育期耗水量及水分利用效率,计算式为

$$ET = \Delta W + P + I + U - D - R \tag{3}$$

$$WUE = Y_a / ET \tag{4}$$

式中 ET——作物实际耗水量,mm

WUE——水分利用效率,kg/(mm·hm²)

Y_a ——作物产量,kg/hm²

ΔW ——生育期前后土壤储水量变化量,mm

P——生育期降雨量,mm

I——灌溉定额,mm

U——地下水补给量,mm,通过达西公式计算^[29]

D——深层渗漏量,mm,由于该沟灌试验灌水定额较小,灌溉水主要储存在计划湿润层中,未产生深层渗漏,故 D 忽略不计

R——地表径流量,mm,各处理小区尾部闭口,且无持续性降雨,R 可忽略不计

1.4 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2003 软件进行数据整理,用 SPSS 软件对数据进行单因素方差分析,并进行显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤储水量时空分布

图 2 为不同秸秆覆盖下土壤储水量空间分布情况,其中 S 为土层深度, D_h 为沟断面水平距离。从图中可以看出,0~80 cm 土壤中,各处理垄背和沟

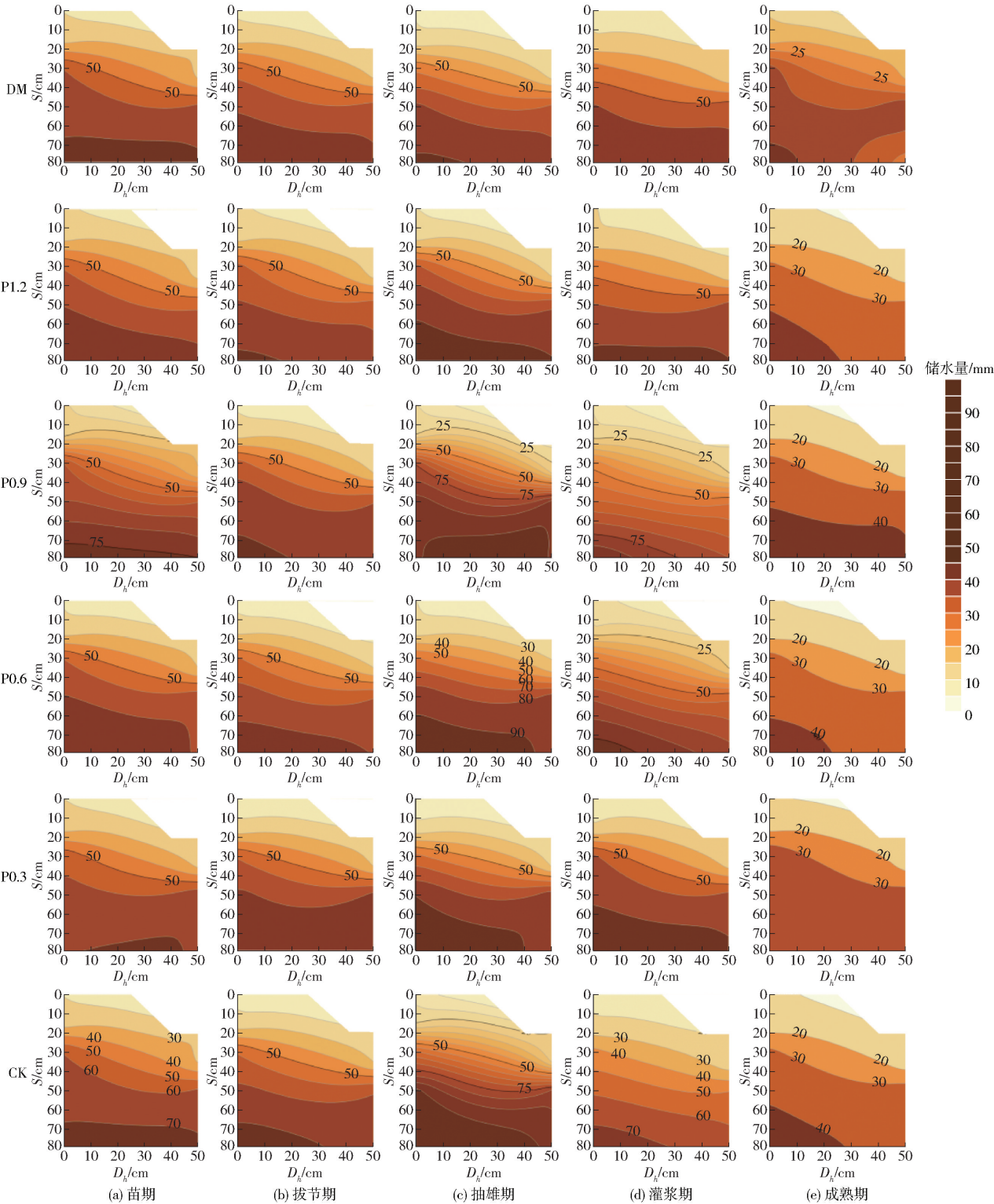


图 2 不同生育期各处理土壤储水量空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of soil water storage in different periods

底土壤储水量分布规律基本一致,均随土层深度的增加逐渐增多。玉米苗期需水强度弱且土壤蒸发较小,此时覆膜处理 DM 和秸秆覆盖处理 (P1.2、P0.9、P0.6) 土壤储水量均高于对照处理 CK,其中 P1.2 和 DM 处理土壤储水量最大,较 CK 分别提高 8.33%、7.39%,这是由于覆膜和秸秆覆盖减少了土壤与大气之间的水分交互通道,降低土壤无效水蒸

发,水分散失减少,为玉米生长提供了良好的土壤环境;P0.3 处理由于秸秆覆盖量较少,不能覆盖整个地表,蓄水保墒性能较 CK 变化不显著 ($P>0.05$)。拔节期受作物耗水及土壤蒸发影响,DM、P1.2、P0.9、P0.6、P0.3、CK 处理表层 0~20 cm 土壤储水量较苗期均有所下降,分别降低 6.51%、2.21%、6.63%、9.69%、16.51%、16.71%,P1.2 处理较 CK

保墒效果最佳,这是由于秸秆覆盖减小了地表土壤与大气的接触面积,土壤蒸发减少,并且秸秆覆盖量越大,保墒效果越好。受灌溉及降雨影响,示范区地下水水位上升,在地下水补给作用下各处理深层(20~80 cm)土壤含水率较苗期均有所增加。抽雄期是玉米生长的第1个需水高峰期,受降雨及灌水影响,各处理0~80 cm土壤储水量较拔节期均有一定程度增加, P1.2、P0.9、P0.6、P0.3、CK处理土壤储水量分别为300.05、296.32、284.25、286.03、288.92 mm,且P1.2和P0.9土壤储水量较CK增加显著,分别提高3.85%和2.56%,而P0.6、P0.3处理土壤储水量较CK差异不显著,原因是由于P0.6、P0.3及CK处理表层含盐量较高,降低了土壤表层的水吸力,土壤持水能力得到增强,储水量变化不显著。考虑到覆膜增温效应促进了玉米的生长发育,增加了玉米的蒸腾耗水,使得DM处理土壤储水量最少,仅为271.74 mm,较CK减少5.95%。灌浆期是玉米生长的主要需水高峰期,此时土壤蒸发及作物耗水剧烈,各处理0~80 cm土壤储水量均有所降低, P1.2、P0.9、P0.6、P0.3处理由于秸秆覆盖降低了土壤蒸发,土壤储水量较CK分别增加3.18%、4.80%、3.10%和2.94%,此时DM处理由于覆膜增温效应增加了作物蒸腾耗水,0~80 cm土壤储水量仍为最少。玉米成熟期,各处理0~80 cm土壤储水量均有一定程度下降,由于此时玉米需水强度较弱,且受到植株遮阴作用降低土壤蒸发,并且土壤经过生育期灌溉及蒸发反复的干湿交替使得土壤容重发生变化,垂直方向土壤水分运动较前期减弱,各处理土壤储水量差异不显著。但由于秸秆的吸水蓄水性能优于土壤,使得秸秆覆盖处理土壤储水量略高于CK处理。整体来看, P1.2、P0.9处理的保墒效果最佳($P < 0.05$),较CK分别增加9.42、8.36 mm。

2.2 不同秸秆覆盖量对土壤盐分迁移的影响

2.2.1 土壤含盐量时空分布

图3为不同秸秆覆盖量情况下土壤盐分空间分布情况,由图可知,垄背土壤含盐量均高于沟底。玉米苗期,各处理垄背及沟底表层土壤均发生积盐现象,但由于覆膜和秸秆覆盖后降低土壤无效水蒸发,各处理0~80 cm土壤含盐量均低于CK处理,并且玉米苗期土壤蒸发及作物耗水强度较弱,各处理土壤含盐量增幅无显著差异($P > 0.05$),此时覆膜和秸秆覆盖均为幼苗的生长提供了较为适宜的土壤环境。玉米拔节期,在土壤蒸发及玉米根系吸水作用下,深层土壤盐分随水分向表层运移,表层0~10 cm土壤中, DM、P1.2、P0.9、P0.6、P0.3、CK处理土壤含盐量均值分别为1.39、1.90、1.84、2.57、2.98、

3.37 g/kg,覆膜和秸秆覆盖处理表层土壤盐分均低于CK处理,且P1.2和DM处理土壤盐分较播种增加幅度最小,仅有33.04%和16.98%,这是由于覆膜和秸秆覆盖后减少了土壤水分的垂向蒸发运移通道,土壤保墒效果增强,减少了盐分向表层土壤的聚集,且随着秸秆覆盖量的增加,保墒抑盐效果越好。随着生育期的延长,至玉米抽雄期,受灌溉影响,沟底0~60 cm呈脱盐状态,深层60~80 cm土壤呈积盐状态,垄背0~10 cm土壤呈积盐状态,10~60 cm土壤呈脱盐状态,60~80 cm土壤呈积盐状态,其中CK处理垄背表层0~10 cm土壤盐分显著高于其他处理,且P1.2和P0.9处理表层土壤含盐量最低,分别仅有1.24、1.22 g/kg,这是由于秸秆覆盖减少了垄背土壤蒸发,土壤保墒能力增强,抑制了盐分向表层土壤运移。玉米灌浆期,受连续降雨影响(7月20—23日累计降雨量为26.8 mm), DM、P1.2、P0.9、P0.6、P0.3、CK处理垄背0~10 cm土壤含盐量分别为1.18、1.06、1.56、1.70、1.60、1.48 g/kg,较抽雄期分别减少34.16%、14.33%、27.48%、36.97%、32.18%、60.48%, P1.2和P0.9处理由于秸秆覆盖后减少了地表与大气的接触面积,表层土壤盐分受降雨淋洗幅度较小。此时作物耗水及土壤蒸发强烈,深层土壤盐分随水分向根层运移,各处理40~80 cm土壤盐分显著增加,且由于覆膜增温及秸秆覆盖保墒效应促进DM和P1.2及P0.9处理玉米生长,作物蒸腾耗水加剧,受根系吸水及地下水补给影响,盐随水走,40~80 cm盐分累积量显著高于其他3个处理。作物进入成熟期之后,受土壤蒸发及蒸腾耗水影响,各处理土壤含盐量均有所增加,但由于此时作物耗水强度较弱,各土层土壤含盐量变化规律与拔节期基本一致,但较前期增幅减小。

研究发现,垄背表层0~10 cm土壤在玉米整个生育期内发生积盐现象,秸秆覆盖量越多受降雨淋洗影响越弱,10~40 cm土壤盐分受到灌溉水的淋洗及土壤蒸发蒸腾影响,每次灌水前后呈现先减少后增加的趋势。沟底土壤由于受到降雨蒸发及灌水影响,各处理土壤含盐量呈动态变化,灌溉期间沟底表层0~20 cm土壤呈脱盐状态,蒸发阶段表层土壤呈积盐状态。由于示范区地下水埋深较浅,始终有地下水对深层土壤进行一定的补给,盐随水走,深层40~80 cm土壤盐分始终处于较高水平。

2.2.2 生育期前后土壤盐分变化

各处理垄背和沟底生育期前后各土层土壤含盐量变化如图4所示,从图4a可以发现,沟灌加剧了盐分的聚集,各处理垄背土壤含盐量均高于初始值,且以表层0~10 cm土壤含盐量增幅最大,达到

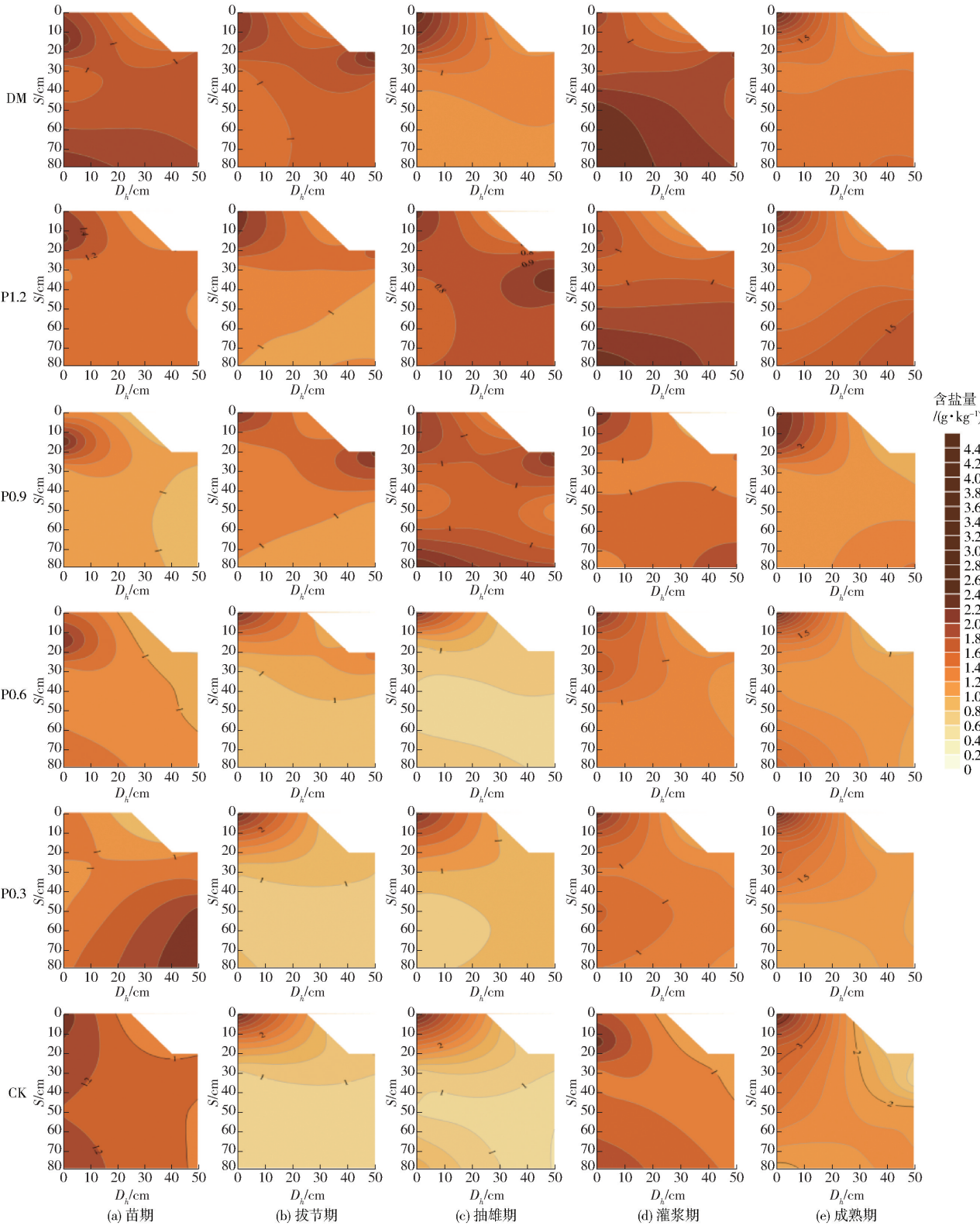


图3 不同生育期各处理土壤含盐量空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of soil salinity in different periods

55.28%~242.64%，这是由于沟垄表层0~10 cm土壤始终没有灌溉水的淋洗，仅沟断面水位之下土壤盐分才能受到灌溉水的淋洗，表层土壤水分仅能通过土壤毛细作用进行补给，而盐随水走，表层盐分产生聚集，后续受到蒸发及蒸腾作用影响，进一步加剧了表层土壤盐分的累积。生育末期DM、P1.2、

P0.9、P0.6、P0.3、CK处理的土壤含盐量均值分别为1.61、1.45、1.58、1.73、1.74、3.04 g/kg，较初始土壤含盐量分别增加27.22%、14.10%、24.74%、36.36%、37.42%、139.25%，覆膜和秸秆覆盖能有效抑制沟垄盐分聚集，且P1.2和P0.9处理抑盐效果最佳，一定程度上促进了玉米产量的形成。

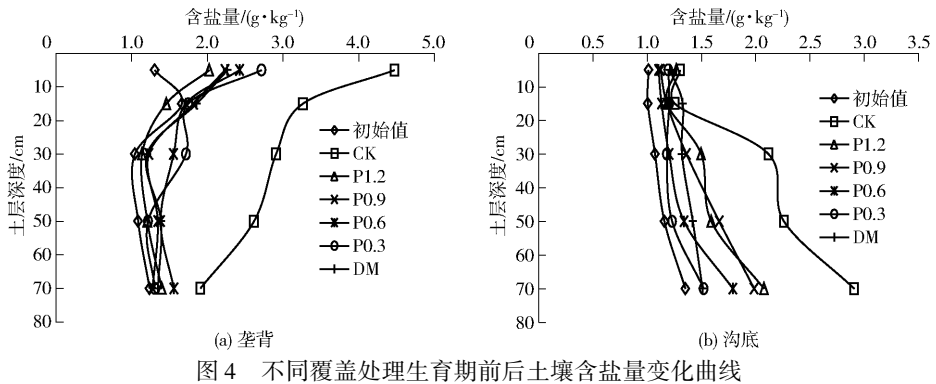


图4 不同覆盖处理生育期前后土壤含盐量变化曲线

从图4b可以看出,灌溉期间沟底土壤在灌溉水及降雨共同淋洗作用下,各处理表层0~20 cm土壤呈脱盐状态,20~80 cm土壤呈积盐状态,但由于灌水定额较小,淋洗效果不佳,盐分始终储存在根系层。随着灌溉期结束,受土壤蒸发及作物蒸腾耗水影响,土壤盐分向表层聚集,此时土壤经过反复的干湿交替使得垂直方向土壤水分运动较前期减弱,DM、P0.3、P0.6、P0.9、P1.2、CK处理表层0~20 cm土壤含盐量较初始增幅较小,仅有10.70%~26.61%,深层20~80 cm土壤在根系吸水及地下水补给作用下,土壤呈积盐状态,较初始分别增加19.05%、10.15%、21.33%、40.39%、44.67%、104.17%。

2.3 产量及水分利用效率分析

由于沟垄不同秸秆覆盖量下土壤水盐运移规律存在较大差距,使得不同处理玉米产量及其水分利用效率也各不相同,如表1所示。由表可知,覆膜和秸秆覆盖后能提高玉米出苗率,其中P0.9处理出苗率最大,P1.2处理由于秸秆覆盖量过大,造成播种期土壤升温较慢,一定程度上抑制了种子的发芽,使得玉米出苗率略有下降。对比分析各处理产量构成指标可知,除P0.3处理外,覆膜和秸秆覆盖处理玉

米轴长、籽粒质量、行粒数及百粒质量指标均高于CK处理,其中P0.6和P0.3处理产量构成指标较CK变化不显著。分析各处理玉米产量及水分利用效率可知,DM、P1.2、P0.9、P0.6处理玉米产量和水分利用效率均高于CK处理,较CK分别提高11.32%、9.03%、20.01%、5.48%和15.29%、12.33%、25.46%、8.21%,这是由于覆膜和秸秆覆盖减小了地表土壤与空气接触面积,减少蒸发、增加土壤墒情,从而有效抑制土壤盐分的聚集,减轻水分和盐分胁迫对作物的影响,进而提高玉米产量和水分利用效率,P0.3处理由于秸秆覆盖量较少,保墒抑盐效果较差,使得产量和水分利用效率较CK处理差异不显著($P>0.05$)。比较覆膜和秸秆覆盖各处理产量和水分利用效率可知,尽管P0.6处理产量和水分利用效率较CK明显提高,但由于其保温保墒抑盐效果低于DM处理,使得产量和水分利用效率较DM分别降低5.24%和6.14%,P0.9处理由于保墒抑盐效果最好,玉米产量和水分利用效率均高于DM处理;当秸秆覆盖量达到 1.2 kg/m^2 时,过量秸秆覆盖会造成播期土壤温度偏低,降低玉米出苗,使得P1.2处理玉米产量和水分利用效率较DM处理略有减少,但差异不显著($P>0.05$)。

表1 不同处理玉米产量及其水分利用效率										
Tab.1 Changes in maize yield and water use efficiency under different treatments										
处理	出苗率/ %	叶面积 指数	轴长/ cm	籽粒 质量/g	行粒数	百粒质量/ g	Y_a / ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	U / mm	ET_a / mm	WUE / ($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$)
DM	90.33 ^{ab}	3.43 ^a	20.40 ^{abc}	226.44 ^a	43.80 ^{ab}	40.30 ^{ab}	11 357.78 ^b	127.79 ^c	523.65 ^{ab}	21.69 ^b
P1.2	89.62 ^b	3.36 ^a	21.08 ^a	222.30 ^a	44.00 ^a	39.80 ^b	11 123.76 ^{bc}	138.87 ^b	526.35 ^{ab}	21.13 ^b
P0.9	93.28 ^a	3.00 ^c	20.04 ^{bcd}	207.92 ^b	42.40 ^b	41.40 ^a	12 243.56 ^a	139.99 ^b	518.73 ^b	23.60 ^a
P0.6	88.77 ^b	3.24 ^b	20.56 ^{ab}	203.48 ^b	40.40 ^c	36.90 ^c	10 762.31 ^c	129.82 ^c	528.65 ^{ab}	20.36 ^c
P0.3	83.45 ^c	3.14 ^b	19.70 ^{cd}	188.60 ^c	39.80 ^c	34.80 ^d	9 975.34 ^d	149.76 ^a	541.48 ^a	18.42 ^d
CK	82.69 ^c	2.98 ^c	19.40 ^d	192.90 ^c	40.20 ^c	35.20 ^d	10 202.77 ^d	148.41 ^a	542.32 ^a	18.81 ^d

注:同列不同字母表示处理之间差异显著($P<0.05$)。

2.4 沟灌秸秆覆盖对农田水土环境及产量等因素的综合影响

为了全面、系统分析沟灌秸秆覆盖对土壤保墒

抑盐效果、玉米出苗、产量以及水分利用效率等因素影响,以各个处理作物生育期储水量 W 、生育期前后盐分累积量 ΔS (盐分抑制作物生长,故 ΔS 均为负

值)、出苗率 E 、叶面积指数 LAI 、产量 Y_a 、水分利用效率 WUE 共 6 种指标作为变量,采用 SPSS 17.0 软件进行主成分分析,按照特征值大于 1 提取 3 个主成分,其中主成分 1、2、3 特征值分别为 3.453、

1.310 和 1.176,其累计方差贡献率达到 98.99%,说明这 3 个主成分可以代表各个处理 6 个指标 98.99% 的信息,具有较好的代表性,各个主成分因子荷载矩阵如表 2 所示。

表 2 主成分因子荷载矩阵
Tab.2 Principal component factor load matrix

主成分因子	特征值	W	ΔS	E	LAI	Y_a	WUE
1	3.453	-0.054	0.730	0.991	0.338	0.937	0.952
2	1.310	0.992	0.474	-0.006	-0.288	-0.096	-0.089
3	1.176	-0.028	0.464	-0.088	0.869	-0.334	-0.292

从表 2 可以看出, E 、 Y_a 以及 WUE 对主成分 1 的贡献率较大,储水量 W 对主成分 2 的贡献率较大, LAI 对主成分 3 的贡献率较大,为消除原始数据量纲和数量级的影响,采用 SPSS 软件对数据进行标准化处理,利用因子荷载矩阵数据计算得到 3 个主成分中各个指标的系数,即 3 个特征向量,将特征向量与各指标标准化后数据相乘即得到这 3 个主成分的函数表达式 F_1 、 F_2 和 F_3 ,计算式为

$F_1 = -0.0291W + 3.928\Delta S + 5.333E + 0.1819LAI + 0.5042Y_a + 0.5123WUE$ (5)

$F_2 = 0.8667W + 0.4141\Delta S - 0.0052E - 0.2516LAI - 0.0836Y_a - 0.0778WUE$ (6)

$F_3 = -0.0258W + 0.4279\Delta S - 0.0811E + 0.8013LAI - 0.3080Y_a - 0.2693WUE$ (7)

每个处理的综合评价模型 F 计算式为

$$F = \frac{3.453}{3.453 + 1.310 + 1.176}F_1 + \frac{1.310}{3.453 + 1.310 + 1.176}F_2 + \frac{1.176}{3.453 + 1.310 + 1.176}F_3$$
 (8)

简化为

$F = 0.5814F_1 + 0.2206F_2 + 0.1980F_3$ (9)

各处理主成分分析综合得分及排名见表 3,从表中可以看出,对照处理 CK 综合评价最差,P0.9 和 P1.2 处理综合评价较好,这说明沟灌 0.9 ~ 1.2 kg/m² 的秸秆覆盖量在改善农田水土环境、保墒抑盐的同时能有效提高玉米产量及水分利用效率,故建议采用 0.9 ~ 1.2 kg/m² 的垄背秸秆覆盖量代替常规覆膜,以减少地膜残留带来的环境影响。

表 3 各处理主成分分析综合得分及排名
Tab.3 Comprehensive score and ranking of principal components analysis of each process

处理	F_1	主成分 1 排名	F_2	主成分 2 排名	F_3	主成分 3 排名	F	综合排名
P0.9	2.2218	1	0.6420	3	-1.6225	6	1.1121	1
P1.2	0.7771	3	0.0139	4	0.7277	2	0.5990	2
DM	1.2896	2	-1.6027	6	0.8955	1	0.5736	3
P0.6	0.1010	4	0.6866	2	0.4652	4	0.3023	4
P0.3	-1.7376	5	1.3678	1	0.6590	3	-0.5781	5
CK	-2.6518	6	-1.1076	5	-1.1248	5	-2.0088	6

3 讨论

文献[24,30]就河套灌区典型盐渍化土壤条件下的畦灌秸秆覆盖进行研究,初步得出 0.6 ~ 0.9 kg/m² 的覆盖量对于抑制土壤水盐聚集、保证作物增产增收具有重要意义,这与本研究得出的适宜秸秆覆盖量(0.9 ~ 1.2 kg/m²) 存在一定差异,这可能是由于本文采用开沟起垄的灌溉种植方式,起垄后土壤结构发生改变,垄背表层土壤盐分产生聚集,易产生盐分胁迫,并且本试验灌水定额偏小,盐分淋洗效果不佳,对此需适当调高秸秆覆盖量,减少土壤

蒸发,提高土壤保墒抑盐能力,避免因盐分胁迫减产。为进一步完善分析结果,下一步需设计更大秸秆覆盖量,例如增加 P1.5 处理(秸秆覆盖量为 1.5 kg/m²),考虑过量秸秆覆盖条件下土壤水盐热运移及作物产量变化情况,增加结果的准确性。

分析秸秆及地膜覆盖对土壤水分分布影响发现,秸秆覆盖能抑制土壤蒸发,降低玉米拔节前耗水量,保障拔节后作物对水分的需求,进而促进玉米生长发育,提高产量和水分利用效率。抽雄灌浆期由于覆膜增温效应使得作物植株高大、耗水强烈,此时 DM 处理土壤储水量最小,这与李辉等^[31]研究成果

一致,因此建议在沟灌玉米生长中后期适当进行补充灌溉,避免因水分胁迫造成作物减产。

沟灌可以提高灌溉水利用效率与作物产量,但非充分灌溉会造成表层 0 ~ 10 cm 土壤盐分的聚集^[32]。倪东宁等^[1]就常规畦灌与沟灌对比发现,玉米生育末期沟灌条件下土壤呈脱盐状态,王增丽等^[33]指出,当灌水定额在 400 ~ 500 m³/hm²时,垄顶、沟底土壤表层均易发生积盐现象,中层发生脱盐现象,这与本文研究结果略有不同,原因是由于本试验灌水定额较小,不仅没有起到淋洗作用还通过沟内侧渗使得一部分盐分向垄上聚集,土壤盐分始终没有排出根系层,同时由于示范区地下水位较高,受土壤蒸发及作物根系吸水影响使得深层土壤水分向表层运移,盐随水走,造成农田盐分聚集,且以土壤表层 0 ~ 20 cm 积盐效应最为剧烈,这与文献[34 - 36]研究结果类似,建议应对农田进行秋浇洗盐,为翌年作物生长提供良好土壤环境。生育末期覆膜处理和秸秆覆盖处理的垄背土壤含盐量均低于 CK 处理,且 CK 处理生育末期根系层土壤盐分较初始增幅最大,P0.9 和 P1.2 处理土壤盐分较初始增幅最少,这表明秸秆覆盖能有效抑制垄背地表蒸发,起到蓄水保墒的目的,从而减少盐分向表层聚集,避免因盐分胁迫造成减产,这与李芙蓉等^[37]研究结果一致。

需要注意的是,干旱区农田秸秆覆盖受水分、养分、温度等多种因素影响,特殊情况下甚至会降低作物产量^[38],陈素英等^[39]发现在黄土高原凉冷地区过量的秸秆覆盖在保墒的同时会降低土壤温度,抑制种子及幼苗发育,进而影响产量。梁建财等^[40]在河套灌区研究发现,秸秆覆盖会增加玉米出苗率,增产效果显著,但秸秆覆盖会阻断土壤对太阳辐射热量的吸收,较未覆盖降低了土壤温度,因此建议秸秆覆盖下春玉米播种期适当延后,这与本文研究结果一致。本文仅就沟灌水土盐进行了研究,沟垄秸秆覆盖下土壤温度与土壤水盐之间的关系尚不明确,需在后续补充研究。

常规开沟起垄覆膜会造成农田白色污染加剧,并且长期地膜覆盖会过度消耗土壤有机质及养分,造成作物减产^[41]。本文对比分析不同秸秆覆盖量对产量影响发现,秸秆覆盖后能明显提高籽粒产量,秸秆覆盖量较小时由于其保墒抑盐效果较差,易产生水分和盐分胁迫,导致玉米产量较覆膜处理略有减少,这与杨长刚等^[42]研究结果一致。尽管覆膜处理具有产量优势,但成本较高、回收困难及地膜残膜等生态问题突出,使其经济效益降低,而秸秆覆盖改善了农田水土环境,增加土壤肥力,同时规避了秸秆焚烧带来的环境问题,其生态效益远高于地膜覆盖。

综合考虑秸秆覆盖对土壤保墒抑盐效果、玉米出苗、产量以及水分利用效率等因素影响,建议沟灌适宜秸秆覆盖量为 0.9 ~ 1.2 kg/m²,此时土壤保墒抑盐效果最好,不仅能满足玉米优质高产目的,也能在一定程度上减少地膜残留带来的白色污染,对于改善农田生态环境具有重要意义。本文仅在轻中度盐渍化土壤上进行了 1 年试验研究,对于河套灌区典型中重度土壤沟垄秸秆覆盖量对其土壤水盐热变化及产量形成仍需进一步补充。

4 结论

(1)玉米苗期,覆膜和秸秆覆盖处理均能减少土壤蒸发、降低土壤无效耗水,进而保证玉米拔节后对水分的需求,避免因产生水分胁迫而导致作物减产。抽雄灌浆期,覆膜增温效应促进了玉米生长发育,增加了玉米的蒸腾耗水,DM 处理土壤储水量最少。玉米成熟期,各处理 0 ~ 80 cm 土壤储水量均有一定程度下降,此时玉米需水强度较小,植株遮阴作用降低了土壤蒸发,并且经过生育期灌溉及蒸发反复的干湿交替使土壤容重发生变化,垂直方向土壤水分运动较前期减弱。整体来看,覆膜和秸秆覆盖均能提高土壤墒情,且 P1.2、P0.9 处理蓄水保墒效果较好($P < 0.05$)。

(2)覆膜和秸秆覆盖处理能有效抑制垄背地表蒸发、减少盐分向表层土壤运移。由于灌水定额较小,淋洗效果不明显,盐分始终未排出根系层,并且受土壤蒸发及地下水补给作用,各土层土壤呈积盐状态;CK 处理生育末期根系层土壤含盐量较初始含盐量增加 139.25%,增幅最大,覆膜和秸秆覆盖处理均能有效抑制盐分聚集,各处理 0 ~ 80 cm 土壤含盐量均低于 CK 处理,且 P1.2 和 P0.9 处理土壤含盐量较初始含盐量增幅最小,仅有 14.10% 和 24.74%,在一定程度上促进了玉米产量的形成。

(3)DM、P1.2、P0.9、P0.6 处理玉米产量和水分利用效率均高于 CK 处理,且以 P0.9 和 DM 处理产量和水分利用效率增幅最大,较 CK 分别提高 20.01%、25.46% 和 11.32%、15.29%,而 P0.3 与 CK 处理之间差异不显著($P > 0.05$)。过量秸秆覆盖造成播期土壤温度偏低,会影响玉米出苗,P1.2 处理玉米产量和水分利用效率较 DM 处理略有降低,但差异不显著($P > 0.05$)。

(4)采用主成分分析法对沟灌秸秆覆盖下土壤保墒抑盐效果、玉米出苗、产量以及水分利用效率等因素进行了综合评价,建议采用 0.9 ~ 1.2 kg/m² 的垄背秸秆覆盖量代替常规覆膜,以减小地膜残留带来的环境污染。

参考文献

- [1] 倪东宁, 李瑞平, 史海滨, 等. 套种模式下不同灌水方式对玉米根系区土壤水盐运移及产量的影响[J]. 土壤, 2015, 47(4):797-804.
NI Dongning, LI Ruiping, SHI Haibin, et al. Effects of different irrigation methods on transport of root zone soil water-salt and yield of maize under interplanting mode[J]. Soil, 2015, 47(4):797-804. (in Chinese)
- [2] 黄权中, 徐旭, 吕玲娇, 等. 基于遥感反演河套灌区土壤盐分分布及对作物生长的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1):102-109.
HUANG Quanzhong, XU Xu, LÜ Lingjiao, et al. Soil salinity distribution based on remote sensing and its effect on crop growth in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1):102-109. (in Chinese)
- [3] 范雷雷, 史海滨, 李瑞平, 等. 河套灌区畦灌灌水质量评价与优化[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6):315-321, 337.
FAN Leilei, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Evaluation and optimization of border irrigation performance in Hetao Irrigation District[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6):315-321, 337. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190636&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.036. (in Chinese)
- [4] 杨文元, 郝培静, 朱焱, 等. 季节性冻融区井渠结合灌域地下水动态预报[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4):137-145.
YANG Wenyuan, HAO Peijing, ZHU Yan, et al. Groundwater dynamics forecast under conjunctive use of groundwater and surface water in seasonal freezing and thawing area[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4):137-145. (in Chinese)
- [5] 王煜, 彭少明, 郑小康. 黄河流域水量分配方案优化及综合调度的关键科学问题[J]. 水科学进展, 2018, 29(5):614-624.
WANG Yu, PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang. Key scientific issues of water allocation plan optimization and comprehensive operation for Yellow River basin[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(5):614-624. (in Chinese)
- [6] 孙贯芳, 屈忠义, 杜斌, 等. 不同灌溉制度下河套灌区玉米膜下滴灌水热盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12):144-152.
SUN Guanfang, QU Zhongyi, DU Bin, et al. Water-heat-salt effects of mulched drip irrigation maize with different irrigation scheduling in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12):144-152. (in Chinese)
- [7] 王学全, 高前兆, 卢琦. 内蒙古河套灌区水资源高效利用与盐渍化调控[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(6):120-125.
WANG Xuequan, GAO Qianzhao, LU Qi. Effective use of water resources and salinity and waterlogging control in the Hetao Irrigation Area of Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(6):120-125. (in Chinese)
- [8] 李培岭, 张富仓. 不同沟灌方式下根区水氮调控对棉花群体生理指标的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2):38-45.
LI Peiling, ZHANG Fucang. Effect of root zone water and nitrogen regulation on cotton population physiological indices under different furrow irrigation patterns[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2):38-45. (in Chinese)
- [9] 吴迪, 孟伟超, 薄晓东, 等. 不同地面灌溉方式对制种玉米产量与水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(增刊1):185-188.
WU Di, MENG Weichao, BO Xiaodong, et al. Effect of different surface irrigation methods on yield and water use efficiency of maize for seed[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(Sup. 1):185-188. (in Chinese)
- [10] 张展羽, 冯根祥, 马海燕, 等. 微咸水膜孔沟灌土壤水盐分布与灌水质量分析[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(11):112-116.
ZHANG Zhanyu, FENG Genxiang, MA Haiyan, et al. Analysis of soil water-salt distribution and irrigation performance under brackish water film hole furrow irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11):112-116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131120&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.020. (in Chinese)
- [11] 聂卫波, 马孝义, 费良军. 基于水量平衡原理的沟灌水流推进解析模型研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5):42-46.
NIE Weibo, MA Xiaoyi, FEI Liangjun. Analytic model of furrow irrigation water movement based on water balance method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5):42-46. (in Chinese)
- [12] 聂坤堃. 沟灌二维入渗水氮运移特性与数值模拟[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
NIE Kunkun. Two-dimensional infiltration water and solute transer characteristic and numerical simulation in furrow irrigation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [13] 潘英华, 康绍忠. 交替隔沟灌溉水分入渗规律及对作物生长和水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2000, 16(1):39-43.
PAN Yinghua, KANG Shaozhong. Irrigation water infiltration in furrows and crop water use of alternative furrow irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(1):39-43. (in Chinese)
- [14] 李燕山, 白建明, 许世坤, 等. 不同灌水量对膜下滴灌冬马铃薯生长及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6):8-13.
LI Yanshan, BAI Jianming, XU Shikun, et al. Effects of different irrigation amount on winter potato growth and water use efficiency by drip irrigation under film[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(6):8-13. (in Chinese)
- [15] 童文杰, 陈中督, 陈卓, 等. 河套灌区玉米耐盐性分析及生态适宜区划分[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10):131-137.
TONG Wenjie, CHEN Zhongdu, CHEN Fu, et al. Analysis of maize salt tolerance in Hetao Irrigation District and its ecological adaptable region[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(10):131-137. (in Chinese)
- [16] 林涛, 汤秋香, 郝卫平, 等. 地膜残留量对棉田土壤水分分布及棉花根系构型的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19):117-125.
LIN Tao, TANG Qiuxiang, HAO Weiping, et al. Effects of plastic film residue rate on root zone water environment and root distribution of cotton under drip irrigation condition[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19):117-125. (in Chinese)
- [17] 高维常, 蔡凯, 曾隰涛, 等. 农用地膜残留对土壤氮素运移及烤烟根系生长的影响[J]. 土壤学报, 2019, 35(19):117-125.
GAO Weichang, CAI Kai, ZENG Yuntao, et al. Impacts of mulching plastic film residue on migration of soil nitrogen and growth of flue-cured tobacco roots[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 35(19):117-125. (in Chinese)
- [18] DORING T F, BRANDT M, HES J, et al. Effects of straw mulch on soil nitrate dynamics, weeds, yield and soil erosion in organically grown potatoes[J]. Field Crops Research, 2005, 94(2):238-249.
- [19] QI Yueling, YANG Xiaomei, PELAEZ A M, et al. Macro- and micro- plastics in soil-plant system: effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth[J]. Science of the Total Environment, 2018, 645:1048-1056.
- [20] 常磊, 韩凡香, 柴雨葳, 等. 秸秆带状覆盖对半干旱雨养区冬小麦田地温和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(9):155-164.

- CHANG Lei, HAN Fanxiang, CHAI Yuwei, et al. Effect of straw belt-mulching on soil temperature and yield of winter wheat in rain-fed semiarid region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(9): 155–164. (in Chinese)
- [21] 殷涛, 何文清, 严昌荣, 等. 地膜秸秆双覆盖对免耕种植玉米田土壤水热效应的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 78–87.
- YIN Tao, HE Wenqing, YAN Changrong, et al. Effects of plastic mulching on surface of no-till straw mulching on soil water and temperature[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(19): 78–87. (in Chinese)
- [22] 卢彩云, 王庆杰, 何进, 等. 炭化秸秆覆盖用于保护性耕作的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(25): 238–243.
- LU Caiyun, WANG Qingjie, HE Jin, et al. Experimental study of the use of carbonized straw covers on conservation tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(25): 238–243. (in Chinese)
- [23] 付强, 马梓昇, 李天霄, 等. 北方高寒区不同覆盖条件下土壤温度差异性分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 152–159.
- FU Qiang, MA Ziao, LI Tianxiao, et al. Variability of soil temperature under different coverage conditions in alpine region of China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 152–159. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141223&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.023. (in Chinese)
- [24] 卢星航, 史海滨, 李瑞平, 等. 覆盖后秋浇对翌年春玉米生育期水热盐及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 148–154.
- LU Xinghang, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Effect of autumn irrigation after mulching on water-heat-salt and yield of following spring maize[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 148–154. (in Chinese)
- [25] 邹平, 杨劲松, 何超. 蒸发条件下土壤水盐热运移的实验研究[J]. 土壤, 2007, 39(4): 614–620.
- ZOU Ping, YANG Jinsong, HE Chao. Movement of water, salt and heat in soil under evaporation condition[J]. Soil, 2007, 39(4): 614–620. (in Chinese)
- [26] 郝远远, 徐旭, 任东阳, 等. 河套灌区土壤水盐和作物生长的 HYDRUS-EPIC 模型分布式模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 110–116.
- HAO Yuanyuan, XU Xu, REN Dongyang, et al. Distributed modeling of soil water-salt dynamics and crop yields based on HYDRUS-EPIC model in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 110–116. (in Chinese)
- [27] 梁建财, 史海滨, 李瑞平, 等. 不同覆盖方式对中度盐渍土壤的改良增产效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 416–424.
- LIANG Jiancai, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Improving effect of mulching methods on moderately saline soil and sunflower yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(4): 416–424. (in Chinese)
- [28] 白岗栓, 杜社妮, 于健, 等. 激光平地改善土壤水盐分布并提高春小麦产量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 125–134.
- BAI Gangshuan, DU Sheni, YU Jian, et al. Laser land leveling improve distribution of soil moisture and soil salinity and enhance spring wheat yield[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 125–134. (in Chinese)
- [29] 李亮, 史海滨, 张义强, 等. 内蒙古河套灌区耕地与荒地间水盐补排规律的研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(5): 73–77.
- LI Liang, SHI Haibin, ZHANG Yiqiang, et al. Transport of soil moisture and salt between irrigated land and saline land in the Inner Mongolia Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(5): 73–77. (in Chinese)
- [30] 梁建财, 史海滨, 杨树青, 等. 秸秆覆盖对盐渍土壤水盐状况及向日葵产量的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1202–1206.
- LIANG Jiancai, SHI Haibin, YANG Shuqing, et al. The effects of straw mulching on soil water, soil salinity and grain yield of a salty sunflower field[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(5): 1202–1206. (in Chinese)
- [31] 李辉, 常磊, 韩凡香, 等. 旧膜及秸秆覆盖对西北旱地马铃薯产量及土壤水热的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(4): 200–207.
- LI Hui, CHANG Lei, HAN Fanxiang, et al. Effects of residual film and straw mulching on potato yield and soil moisture and temperature in northwest arid land of China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(4): 200–207. (in Chinese)
- [32] 刘目兴, 王静爱, 刘连友, 等. 旱作农田不同结构垄作的生态生产效益研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 114–118.
- LIU Muxing, WANG Jingai, LIU Lianyou, et al. Research on ecological and productive functions of ridge tillage with different structures in semi-arid area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(6): 114–118. (in Chinese)
- [33] 王增丽, 温广贵. 干旱区垄膜沟灌条件下土壤水盐空间分布特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(5): 47–51.
- WANG Zengli, WEN Guanggui. Distributions of soil moisture and salinity under ridge-tillage and furrow irrigation with film mulch in an arid area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(5): 47–51. (in Chinese)
- [34] RAJAK D, MANJUNATHA M V, RAJKUMAR G R, et al. Comparative effects of drip and furrow irrigation on the yield and water productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in a saline and waterlogged vertisol [J]. Agricultural Water Management, 2006, 83(1): 30–36.
- [35] LIU H J, WANG X M, ZHANG X, et al. Evaluation on the responses of maize (*Zea mays* L.) growth, yield and water use efficiency to drip irrigation water under mulch condition in the Hetao Irrigation District of China [J]. Agricultural Water Management, 2017, 179(1): 144–157.
- [36] CHEN L J, QI F. Soil water and salt distribution under furrow irrigation of saline water with plastic mulch on ridge [J]. Journal of Arid Land, 2013, 5(1): 60–70.
- [37] 李芙荣, 杨劲松, 吴亚坤, 等. 不同秸秆埋深对苏北滩涂盐渍土水盐动态变化的影响[J]. 土壤, 2013, 45(6): 1101–1107.
- LI Furong, YANG Jinsong, WU Yakun, et al. Effects of straw mulch at different depths on water-salt dynamic changes of coastal saline soil in North Jiangsu Province[J]. Soil, 2013, 45(6): 1101–1107. (in Chinese)
- [38] 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.
- GAO Fei, JIA Zhikuan, HAN Qingfang, et al. Effects of straw mulching quantity on soil water use and spring maize yield[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(1): 104–112. (in Chinese)
- [39] 陈素英, 张喜英, 裴冬, 等. 玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 171–173.
- CHEN Suying, ZHANG Xiying, PEI Dong, et al. Effects of corn straw mulching on soil temperature and soil evaporation of winter wheat field[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10): 171–173. (in Chinese)

- [20] 王转卫. 基于介电频谱与光谱技术的水果内部品质无损检测方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [21] 中华人民共和国农业部. 水果和蔬菜可溶性固形物含量的测定 折射仪法: NY/T 2637—2014[S]. 北京: 中国标准出版社,2014.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 食品中总酸的测定: GB/T 12456—2008[S]. 北京: 中国标准出版社,2008.
- [23] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社,2017.
- [24] ELMASRY G, WANG M, ELSAYED A, et al. Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 81(1): 98–107.
- [25] LI Jiangbo, HUANG Wenqian, ZHAO Chunjiang, et al. A comparative study for the quantitative determination of soluble solids content, pH and firmness of pears by Vis/Nir spectroscopy[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 116(2): 324–332.
- [26] 李江波, 彭彦昆, 陈立平, 等. 近红外高光谱图像结合 CARS 算法对鸭梨 SSC 含量定量测定[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(5): 1264–1269.
- LI Jiangbo, PENG Yankun, CHEN Liping, et al. Near-infrared hyperspectral imaging combined with CARS algorithm to quantitatively determine soluble solids content in “Ya” pear[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(5): 1264–1269. (in Chinese)
- [27] YE S F, WANG D, MIN S G. Successive projections algorithm combined with uninformative variable elimination for spectral variable selection[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2008, 91(2): 194–199.
- [28] 刘燕德, 肖怀春, 孙旭东, 等. 柑桔叶片黄龙病光谱特征选择及检测模型[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(3): 180–187.
- LIU Yande, XIAO Huaichun, SUN Xudong, et al. Spectral feature selection and discriminant model building for citrus leaf Huanglongbing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(3): 180–187. (in Chinese)

(上接第 282 页)

- [21] 范雪梅, 戴廷波, 姜东, 等. 花后干旱与渍水下氮素供应对小麦碳氮运转的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 63–67.
- FAN Xuemei, DAI Tingbo, JIANG Dong, et al. Effects of nitrogen rates on carbon and nitrogen assimilate translocation in wheat grown under drought and water logging from anthesis to maturity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6): 63–67. (in Chinese)
- [22] 王朝辉, 王兵, 李生秀. 缺水与补水对小麦氮素吸收及土壤残留氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(8): 1339–1343.
- WANG Zhaohui, WANG Bing, LI Shengxiu. Influence of water deficit and supplemental irrigation on nitrogen uptake by winter wheat and nitrogen residual in soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 1339–1343. (in Chinese)
- [23] LI F S, KANG S Z, ZHANG J H, et al. Effects of atmospheric CO₂ enrichment, water status and applied nitrogen on water and nitrogen-use efficiencies of wheat [J]. *Plant and Soil*, 2003, 254(2): 279–289.
- [24] ZHU X K, GUO W S, FENG C N, et al. Nitrogen absorption and utilization differences among wheat varieties for different enduses [J]. *Plant Nutrition & Fertilizing Science*, 2005, 11(2): 148–154.
- [25] SCHENK M K. Regulation of nitrogen uptake on the whole plant level [J]. *Plant and Soil*, 1996, 181(1): 131–137.
- [26] 侯有良, O'BRIEN L, 钟改荣. 小麦不同器官氮素累积分布动态规律的研究[J]. *作物学报*, 2001, 27(4): 493–499.
- HOU Youliang, O'BRIEN L, ZHONG Gairong. Study on the dynamic changes of the distribution and accumulation of nitrogen in different plant parts of wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(4): 493–499. (in Chinese)

(上接第 293 页)

- [40] 梁建财, 史海滨, 李瑞平, 等. 覆盖对盐渍土壤冻融特性与秋浇灌水质量的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 98–105.
- LIANG Jiancai, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Effect of mulching on salinized soil freezing and thawing characteristics and autumn irrigation quality[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 98–105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150415&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.015. (in Chinese)
- [41] 蔡太义, 张合兵, 黄会娟, 等. 不同量秸秆覆盖对春玉米光合生理的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(11): 2128–2135.
- CAI Taiyi, ZHANG Hebing, HUANG Huijuan, et al. Effects of cropping systems using straw mulching on photosynthetic physiology of spring maize during different rates[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2128–2135. (in Chinese)
- [42] 杨长刚, 柴守玺, 常磊. 半干旱雨养区不同覆膜方式对冬小麦土壤水分利用及产量的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(8): 2676–2685.
- YANG Changgang, CHAI Shouxi, CHANG Lei. Influences of different plastic film mulches on soil water use and yield of winter wheat in semiarid rain-fed region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(8): 2676–2685. (in Chinese)