

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.09.030

秸秆还田下保水剂用量对砂性土性状与玉米产量的影响

李 荣 勉有明 侯贤清 李培富 王西娜
(宁夏大学农学院, 银川 750021)

摘要:为探讨宁夏盐环定扬黄灌区秸秆还田条件下保水剂用量对砂性土保水保肥效应及玉米产量的影响,通过3年大田试验,以不施保水剂为对照,研究保水剂施用量(30、60、90、120 kg/hm²)对砂性土壤容重、水分、养分及玉米生长、产量和水分利用效率的影响,并对经济效益进行分析。结果表明,与对照相比,施用保水剂可有效降低0~40 cm层土壤容重,改善土壤孔隙状况,以保水剂施用量90、120 kg/hm²处理效果较优。在玉米整个生育期,施用保水剂60、90、120 kg/hm²时0~100 cm层土壤贮水量较高,其3年平均分别较对照显著提高18.3%、21.6%和23.5%。施用保水剂60、90 kg/hm²处理耕层(0~40 cm)土壤有机质、有效磷和速效钾含量较对照显著增加,其改善土壤养分状况效果最佳。施用保水剂可提高玉米植株株高、茎粗和地上部生物量,施用保水剂60、90 kg/hm²处理的效果最为显著。与对照相比,施用保水剂60 kg/hm²处理对提高作物水分利用效率、玉米增产和增收效果最佳,其3年平均玉米水分利用效率、产量和纯收益分别较对照显著增加30.4%、26.0%和20.7%。施用保水剂60 kg/hm²时能有效改善砂性土壤理化性状,实现玉米的增产增收,可在宁夏盐环定扬黄灌区秸秆还田条件下的滴灌玉米田推广应用。

关键词: 保水剂; 砂性土; 秸秆还田; 玉米; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S227.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)09-0260-12 OSID: 

Effect of Super Absorbent Polymer Rate on Sandy Soil Property and Maize Yield under Straw Returning

LI Rong MIAN Youming HOU Xianqing LI Peifu WANG Xi'na
(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: With the aim to explore effect of super absorbent polymers (SAP) on sandy soil moisture and fertilizer conservation and maize yield under straw returning condition in Yellow River pumping irrigation area of Yanhuangding, Ningxia, a three-year field study was conducted to investigate effects of different rates (30 kg/hm², 60 kg/hm², 90 kg/hm², and 120 kg/hm²) of SAP under straw returning condition on sandy soil bulk density, water storage, nutrient, maize growth, yield, water use efficiency and economic benefit, and the treatment without SAP was used as the control. The results showed that the soil bulk density of different SAP rates in the 0~40 cm soil layer was decreased compared with the control, while the total soil porosity was greatly improved, and the effects of SAP with 90 kg/hm² and 120 kg/hm² treatments were the best. The soil water storage capacity at 0~100 cm soil layer under SAP with 60 kg/hm², 90 kg/hm² and 120 kg/hm² was better than that of other treatment in the whole growing season of maize. The mean soil water storage capacity of SAP with 60 kg/hm², 90 kg/hm² and 120 kg/hm² was increased by 18.3%, 21.6%, and 23.5% compared with the control, respectively. The application of SAP with 60 kg/hm² and 90 kg/hm² obviously increased the soil organic matter, available P and available K contents in 0~40 cm soil layer, resulting in the best results compared with the control. The application of SAP significantly increased the maize plant height, stem diameter, and above-ground biomass, especially the application of 60 kg/hm² and 90 kg/hm² of SAP was the most significant. The mean maize yield,

收稿日期: 2020-10-19 修回日期: 2020-11-30
基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2019AAC03058、2020AAC03098)、宁夏青年科技人才托举工程项目(科协发组字[2017]76号)、国家自然科学基金项目(31760370、31860362)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD22B05-03)
作者简介: 李荣(1984—),女,副教授,主要从事农业节水技术研究,E-mail: lirong_mail@126.com
通信作者: 侯贤清(1981—),男,副教授,主要从事土壤培肥研究,E-mail: houxianqing1981@126.com

water use efficiency and net income with 60 kg/hm² of SAP was the best among the treatments, which were 30.4%, 26.0%, and 20.7% higher than that of the control. Therefore, the application of SAP with 60 kg/hm² under straw returning condition could effectively improve sandy soil physic-chemical properties, promote the growth, and bring an increase in maize yield and income of farmers. The research results could be recommended to apply in maize field in the Yellow River pumping irrigation areas of Yanhuanding, Ningxia.

Key words: super absorbent polymer; sandy soil; straw returning; maize; yield; water use efficiency

0 引言

玉米是宁夏的三大粮食作物之一,是播种面积和单产增长速度最快的作物,总产量占粮食总产的46%,位居粮食作物之首^[1],提高玉米产量对保障宁夏粮食安全至关重要。宁夏盐环定(盐池、环县、定边)扬黄灌区光热资源丰富,玉米单产水平高,发展潜力大^[2]。然而,该区玉米种植不仅缺水,且土壤以荒漠草原植被类型下形成的灰钙土为主,部分区域严重沙化形成风沙土,土壤瘠薄,肥力低下,成为限制玉米生产的主要因素之一^[3]。

在节水技术措施中,使用化学保水材料是旱区发展节水农业比较理想的措施^[4],保水剂应用是近年来受到重视的一种化学抗旱节水增产技术,在农业生产等诸多方面具有广阔的应用发展前景^[5-7]。保水剂是一种具有强吸水能力的新型高分子聚合物,能够反复吸水、释水^[8],疏松土壤,减缓土壤水分的释放速度,显著抑制水分的蒸发,具有抗旱保水、改良土壤、水土保持与促进养分吸收等多重功能,可为作物提供适宜的水分环境,从而促进作物生长及提高水分的利用效率^[9]。将保水剂施于土壤后,能加强土壤的吸水能力,增加土壤含水率,同时又能有效改善土壤持水性等物理特性^[10-11]。但保水剂在不同地区、气候、土壤类型下应用效果差异较大,使得实际生产中保水剂的应用效果千差万别^[12]。

秸秆还田作为农业生产中重要的土壤培肥措施,既可充分利用秸秆资源、减轻焚烧对生态环境的不良影响,又是实现农业可持续性发展的有效途径之一,其主要作用体现在改善土壤物理结构,增强土壤生物活性,提高土壤有机质含量等方面^[13-14]。保水剂可有效减少土壤水分和养分流失,促进作物的干物质积累,显著提高水肥利用效率^[15-16]。宁夏盐环定扬黄灌区季节性干旱频发,沙地土壤贫瘠,且漏水漏肥严重,将保水剂的保水保肥功能和秸秆还田增加土壤肥力的功能有机结合,对促进该地区砂性土壤改良和农业生产具有重要现实意义,特别是对砂性土壤容重达到1.5 kg/cm³以上的土壤改良。然而,灌区秸秆还田条件下施用保水剂对砂性土壤性状改良及作物产量的影响鲜有研究。因此,本文针对宁夏盐环定扬黄灌

区土壤沙化严重、保水保肥性能差等特点,在秸秆还田条件下,采用沃特多功能保水剂研究其不同用量对砂性土壤理化性质及玉米生长、产量和水分利用效率的影响,探明其对土壤性状的改良和培肥效应,以期宁夏盐环定扬黄灌区砂性土的培肥增产及秸秆还田条件下合理施用保水剂提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2016年4月—2018年10月在宁夏回族自治区盐池县冯记沟乡三墩子村天朗现代农业公司玉米试验田进行。试验区位于宁夏东部,东与青山接壤,西与灵武市马家滩镇毗邻,北与王乐井乡搭界,南与惠安堡、大水坑乡相连。该区为宁夏盐环定扬黄灌区(37°40'N,106°51'E,海拔1 300 m左右),属中温带干旱、半干旱气候区,年均气温22.4℃,年均降水量280 mm左右,年内降水分布极不平衡,主要集中在6—9月,而同期蒸发量高达2 000~3 000 mm,无霜期151 d;大于等于10℃积温2 949.9℃,日照时数2 800 h。2016—2018年月度降水量和气温如图1所示,3年玉米生育期平均降水量为207.1 mm,平均气温为9.4℃。其中,2016年玉米生育期(4—9月)降水量为224.2 mm,2017年为173.8 mm,2018年为223.4 mm。土壤开垦多年,因周边过度放牧,原灰钙土表层被深厚风积沙土层覆盖,土壤砂性,土壤上层为沙壤土,下层为淡灰钙土,偏碱性。

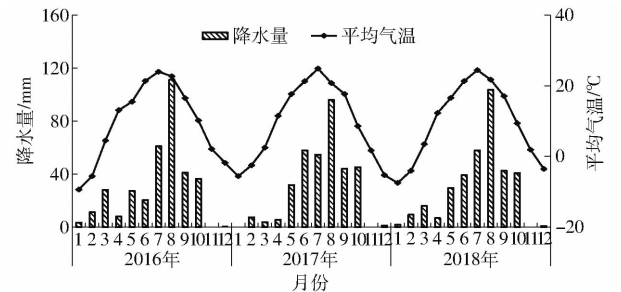


图1 试验地月降水量和平均气温
Fig.1 Monthly precipitation and air temperature in growth period at experiment station

1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计。设保水剂施用

水平为 30 (W30)、60 (W60)、90 (W90)、120 kg/hm² (W120),以不施保水剂为对照(CK),5 个处理,3 次重复,共 15 个小区,小区面积为 120 m² (12 m × 10 m)。供试保水剂为胜利油田东营华业新材料有限公司生产的沃特多功能保水剂(有机无机杂化保水剂,吸水倍率为 500 ~ 600,0.18 ~ 2.0 mm 粒径大于等于 95%,pH 值为 6.0 ~ 8.0)。保水剂施用具体方法:2016、2017 年在玉米苗期(三叶期),根据试验设计保水剂用量计算出试验小区用量,将保水剂与小区内细土按质量比 1:10 混合均匀后,根据小区植株密度计算出保水剂不同穴施量,在玉米种植行两株玉米中间(株距 22 cm)距离玉米植株 10 cm 范围内用手铲(长 15 cm、宽 5 cm)挖穴(穴长 10 cm、宽 5 cm、深 10 cm),按处理区不同施用量施入整个穴中。2018 年,在玉米播种期,根据试验设计保水剂和基肥(磷酸二铵)用量计算出试验小区用量,将保水剂不同用量与磷酸二铵(N 质量分数大于等于 18%,P₂O₅ 质量分数大于等于 46%)混合作为种肥,采用气吸式播种机施入 15 cm 深土层中。

试验地前茬作物为春玉米,经测定 2016 年处理前耕层(0 ~ 40 cm)土壤容重高达 1.787 g/cm³,总孔隙度仅为 32.6%,土壤有机质质量比为 4.7 g/kg,碱解氮、有效磷、速效钾质量比分别为 35.2、4.6、67.5 mg/kg,按照国家第二次农田土壤普查养分分级标准属低等肥力,土壤保肥和供肥差。试验所用玉米秸秆有机养分质量比分别为有机碳 705.8 g/kg、全氮 12.0 g/kg、全磷 2.6 g/kg、全钾 12.7 g/kg。试验布设前将前一年收获后的玉米秸秆利用秸秆还田机切碎成 3 ~ 5 cm 小段,进行翻压还田(还田深度 20 cm),还田量为 9 000 kg/hm²,并配施 300 kg/hm² 尿素,有助于秸秆腐解。供试玉米品种 2016 年为陇单 9 号,2017、2018 年为先玉 1225。采用气吸式播种机精量播种,播种、铺滴灌带、覆土一体完成。玉米宽窄行种植,宽行 70 cm,窄行 30 cm,株距 22 cm,种植密度为 95 250 株/hm²。滴灌带铺设于窄行之间,干土播种,播种后滴水。3 年试验期间玉米播种时基施磷酸二铵用量 300 kg/hm²,玉米生育期灌水及施肥方式采用滴灌施肥,灌水和施肥情况见表 1。研究期间玉米生育期平均总灌水量为 2 400 m³/hm²,生育期追施尿素(N 质量分数大于等于 46%)和硫酸钾(K₂O 质量分数大于等于 50%)用量分别为 780 kg/hm²和 165 kg/hm²。玉米分别于 2016 年 4 月 20 日、2017 年 4 月 22 日和 2018 年 4 月 26 日播种,于 2016 年 9 月 28 日、2017 年 9 月 30 日和 2018 年 10 月 2 日收获。

表 1 玉米不同生育期灌水和施肥情况				
Tab.1 Irrigation and fertilization in different growing periods of maize				
生育时期	灌水日期	灌水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	追肥量/(kg·hm ⁻²)	
			尿素	硫酸钾
播种	4 月下旬	120		
苗期	5 月中旬	150	60	
	6 月上旬	225	75	
	6 月中旬	200	75	
拔节	6 月下旬	205	75	75
	7 月上旬	375	75	
	7 月中旬	225	75	45
抽雄	7 月下旬	150	100	
	8 月上旬	300	100	45
灌浆	8 月中旬	125	100	
	8 月下旬	100	45	
收获	9 月上旬	225		
合计		2 400	780	165

1.3 测定指标及方法

(1)土壤容重:在 2016 年 4 月中旬试验处理前及 2018 年 10 月收获后玉米种植行两株玉米行中间(玉米株距 22 cm),采用环刀取样法测定 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 层土壤容重,并计算土壤孔隙度。土壤孔隙度 P 计算式为

$$P = (1 - \gamma/\rho) \times 100\%$$
 (1)

式中 γ ——土壤容重,g/cm³
 ρ ——土壤密度近似值,取 2.65 g/cm³

(2)土壤含水率:在玉米播种、拔节、抽雄、吐丝、灌浆和收获期采用土钻(直径为 0.08 m)干燥法分别测定 0 ~ 100 cm 层土壤质量含水率(每 20 cm 取 1 个土样),并结合降水量和灌水量,计算玉米的总耗水量。

土壤贮水量 W (mm)计算式为

$$W = 10a\gamma h$$
 (2)

式中 a ——土壤质量含水率,%
 h ——土层深度,cm

试验区因地下水位较深,多在 50 m 以下,故地下水水上移补给量、深层渗漏量、地面径流均忽略不计,则作物耗水量 ET 计算式为

$$ET = R + I + \Delta W$$
 (3)

式中 R ——作物生育期降雨量,mm
 I ——生育期灌水量(湿润层按 1 m 计算, m³/hm²换算为 mm,转换系数为 0.1)
 ΔW ——玉米播种期和收获期土壤贮水量之差,mm

水分利用效率 WUE 以单位耗水量下作物经济产量的比值表示,计算式为

$$WUE = Y/ET$$
 (4)

式中 Y ——作物经济产量, kg/hm^2

(3)土壤养分:在 2016 年试验处理前、2017 年和 2018 年玉米收获后,分别测定 0 ~ 40 cm 层土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量。

(4)玉米生长:在玉米主要生育期,每处理区随机选取代表性的植株 5 株,分别测定玉米植株株高、茎粗和地上部生物量。株高:用卷尺测量从玉米茎的基部至顶端(心叶)的高度(cm);茎粗:用游标卡尺测量玉米植株茎基部的直径(mm);地上部生物量:选取长势基本一致的植株,杀青干燥,测定其地上部生物量($\text{g}/\text{株}$)。

(5)产量:玉米收获期,每个处理选取 3 点,每点收获 3 m 双行果穗,脱粒,干燥,称量(籽粒产量以含水率 14% 计算)。同时,计算其经济效益。

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2003 制图,SAS 8.0 进行方差分析,并用 LSD 法($P < 0.05$)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 保水剂施用量对 0 ~ 40 cm 层土壤容重及孔隙度的影响

土壤容重和孔隙度是衡量土壤供肥、保肥能力及土壤紧实状况的重要指标。由图 2a(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同)看出,保水剂施用量对玉米收获期耕层(0 ~ 40 cm)土壤容重有显著影响。3 年秸秆还田后,施用保水剂各处理耕层土壤容重由大到小表现为处理前、CK、W30、W120、W90、W60。与试验处理前相比,各处理耕层平均土壤容重显著降低,降幅为 10.9% ~ 22.6%。W60、W90、W120 处理 0 ~ 20 cm 层土壤容重分别较 CK 显著降低 9.5%、7.3% 和 4.4%,20 ~ 40 cm 层分别较 CK 显著降低 11.7%、7.9% 和 7.6%;而 W30 与 CK 处理间土壤容重无显著差异,W30、W60、W90、W120 处理间无显著差异。这表明施用适量保水剂对耕层土壤容重降幅显著。

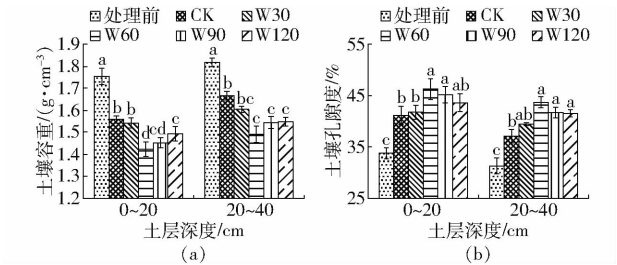


图 2 不同保水剂施用量下 0 ~ 40 cm 土壤容重和孔隙度
Fig.2 Changes of soil bulk density and soil porosity at 0 ~ 40 cm depth under super absorbent polymer dosages

秸秆还田条件下保水剂可降低土壤容重,增加土壤孔隙度,各处理 0 ~ 40 cm 层土壤孔隙度与容重

变化趋势相反。保水剂不同用量下耕层土壤孔隙度显著高于试验处理前(图 2b)。各处理土壤孔隙度与试验处理前相比提高幅度为 18.4% ~ 39.4%。0 ~ 20 cm,W60 和 W90 处理土壤孔隙度均显著高于 CK,分别较 CK 提高 12.4%、9.7%,而 W30 和 W120 处理与 CK 间差异均不显著,W60、W90、W120 处理间亦无显著差异。20 ~ 40 cm 层,施用保水剂各处理土壤孔隙度均较对照显著增加,以 W60 处理土壤孔隙度增幅最高,其次是 W90 和 W12 处理,分别较 CK 显著提高 17.8%、12.4% 和 12.0%,而保水剂不同用量处理间差异均不显著,W30 与 CK 处理间无显著差异。可见,秸秆还田条件下适量施用保水剂能显著改善 0 ~ 40 cm 层土壤的孔隙状况。

2.2 保水剂施用量对玉米生育期土壤水分变化的影响

由于当地降水量、灌水量及保水剂施用量的不同,玉米生育期各处理 0 ~ 100 cm 层土壤贮水量变化较大(图 3)。不同生育期降水量、灌水量及玉米耗水强度不同,2016、2018 年各处理土壤贮水量呈升高-降低-升高,而 2017 年则呈降低-升高-降低的变化趋势。玉米生育前期植株较小,地面裸露面积大,保水剂施用量与对照均存在显著差异。2016 年玉米拔节期,施用保水剂各处理土壤贮水量均高于对照,其中 W90、W120 处理分别较 CK 显著提高 18.4%、21.5%。2017 年拔节期,施用保水剂各处理土壤贮水量均显著高于对照,W30、W60、W90 和 W120 处理土壤贮水量分别较 CK 显著提高 18.3%、21.7%、16.1%、10.6%;2018 年,随保水剂施用量增加,土壤贮水量显著增加,W30、W60、W90、W120 处理分别较 CK 显著提高 13.0%、18.5%、24.8%、27.9%。

在生育中期(抽雄-吐丝期),气温较高,土壤水分蒸发强烈,作物耗水量增加,各处理土壤贮水量降至最低。2016 年,随保水剂施用量的增加,各处理土壤贮水量升高,其保墒效果逐渐增强。在玉米抽雄期,W90、W120 处理分别较 CK 显著提高 20.1%、22.4%;在吐丝期,保水剂不同施用量下土壤贮水量较对照均有不同程度增加,W30、W60、W90、W120 处理分别较 CK 显著提高 6.1%、16.2%、19.9%、27.3%。2017 年抽雄至吐丝期,施用保水剂各处理土壤贮水量均显著高于对照,以 W30、W60 和 W90 处理保水效果最佳,分别较 CK 显著提高 22.2%、27.7% 和 22.9%。2018 年,施用保水剂各处理土壤贮水量同 2016、2017 年变化一致,且均随保水剂施用量的增加而升高,W30、W60、W90 和 W120 处理分别平均较 CK 显著提高 13.6%、17.6%、27.9% 和 36.5%。

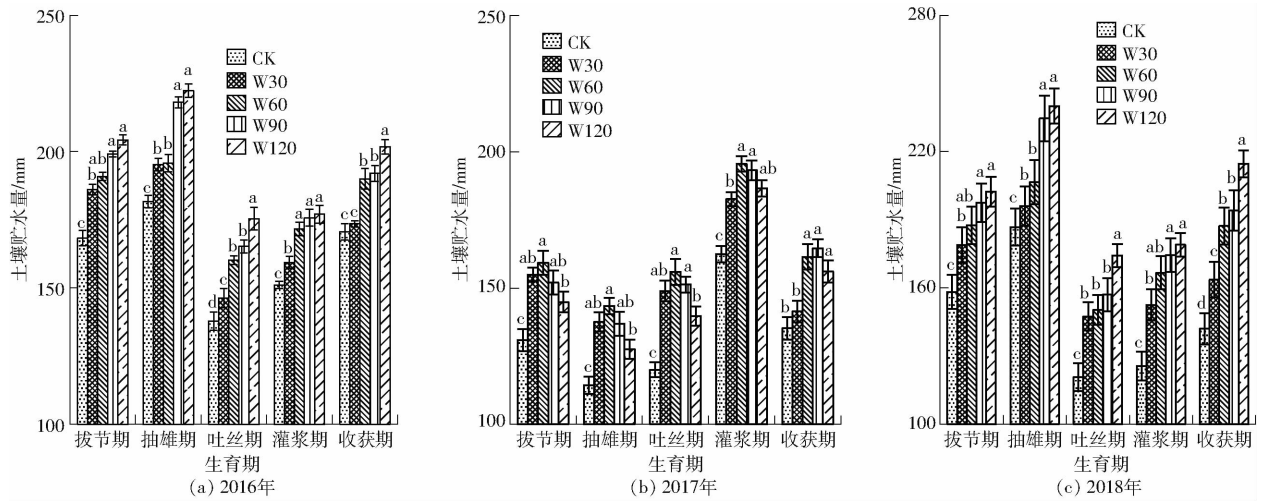


图3 不同保水剂施用量下玉米生育期土壤贮水量的变化

Fig.3 Effects of super absorbent polymer dosages on change of soil water storage at growing stage of maize

玉米生育后期(灌浆-收获期),不同处理0~100 cm 层土壤水分有所恢复。2016 年,施用保水剂各处理与对照相比,土壤保水效果得到显著改善,其中 W60、W90 和 W120 处理最佳,分别平均较 CK 显著提高 12.4%、14.3%、17.7%。2017 年,施用保水剂 W60 处理保水效果最佳,W90 和 W120 处理次之,分别较 CK 显著提高 19.9%、20.2%、15.1%。2018 年,施用保水剂各处理土壤贮水量均显著高于对照,以 W120 处理保水效果最佳,W90 和 W60 处理次之,分别较 CK 平均显著提高 47.0%、37.6% 和 32.2%。综合 3 年研究结果发现,施用保水剂 W60

和 W90 处理在玉米整个生育期土壤贮水量较高,保水效果最佳。

2.3 保水剂施用量对玉米收获期土壤养分变化的影响

试验处理前及玉米收获后各处理土壤养分含量变化(表 2)表明,2016 年玉米收获期土壤有机质和有效磷含量与试验处理前相比,W60 和 W90 处理均明显增加,但差异不显著,其他处理则均不利于有机质和有效磷含量的提升,其中 CK 和 W30 处理有机质和有效磷含量的消耗程度最大。土壤速效钾含量 2016 年各处理均显著低于试验处理前。经过第 2

表 2 保水剂施用量对 0~40 cm 层土壤养分含量的影响

Tab.2 Effects of super absorbent polymer dosages on soil nutrient content in 0~40 cm layer					
年份	处理	有机质质量比/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮质量比/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷质量比/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾质量比/ (mg·kg ⁻¹)
2016	处理前	(4.70±0.15) ^a	(35.20±1.12) ^a	(4.60±0.34) ^{ab}	(67.50±2.74) ^a
	CK	(3.46±0.17) ^b	(23.61±0.93) ^c	(2.38±0.26) ^c	(30.48±3.34) ^c
	W30	(3.88±0.20) ^{ab}	(21.88±1.34) ^c	(3.57±0.18) ^b	(30.90±0.93) ^c
	W60	(4.92±0.10) ^a	(29.75±1.42) ^{ab}	(5.98±0.29) ^a	(50.20±2.44) ^b
	W90	(4.92±0.06) ^a	(28.00±1.04) ^{ab}	(5.62±0.24) ^a	(40.40±4.02) ^{bc}
	W120	(4.63±0.12) ^a	(24.50±1.26) ^{bc}	(4.36±0.22) ^{ab}	(30.00±1.72) ^c
2017	处理前	(4.70±0.15) ^{ab}	(35.20±1.12) ^a	(4.60±0.34) ^d	(67.50±2.74) ^c
	CK	(4.07±0.07) ^c	(22.51±1.21) ^b	(5.02±0.13) ^{cd}	(69.95±3.62) ^c
	W30	(4.51±0.14) ^{bc}	(26.65±0.88) ^b	(6.83±0.36) ^{ab}	(78.14±2.85) ^b
	W60	(5.47±0.08) ^a	(34.21±0.84) ^a	(7.46±0.43) ^a	(84.88±3.72) ^a
	W90	(5.10±0.16) ^a	(28.65±1.35) ^{ab}	(6.12±0.38) ^{bc}	(89.09±4.08) ^a
	W120	(4.31±0.10) ^{bc}	(24.48±0.98) ^b	(5.36±0.29) ^c	(80.08±3.96) ^{ab}
2018	处理前	(4.70±0.15) ^{ab}	(35.20±1.34) ^{bc}	(4.60±0.30) ^c	(67.52±1.99) ^c
	CK	(4.20±0.22) ^b	(31.74±0.99) ^c	(5.53±0.22) ^{bc}	(70.64±2.57) ^{bc}
	W30	(4.60±0.10) ^b	(33.98±1.20) ^c	(7.61±0.17) ^a	(82.58±2.46) ^{ab}
	W60	(5.62±0.18) ^a	(39.87±1.65) ^a	(7.89±0.29) ^a	(88.33±3.12) ^a
	W90	(5.41±0.24) ^a	(38.13±0.72) ^{ab}	(6.21±0.26) ^{ab}	(85.91±2.85) ^a
	W120	(4.26±0.16) ^b	(34.61±1.53) ^{bc}	(5.68±0.41) ^b	(75.16±3.04) ^b

注:同列数字后不同小写字母表示处理间差异达显著水平(P<0.05)。下同。

年和第 3 年秸秆还田后,2017、2018 年玉米收获期土壤有机质含量与试验处理前相比,W60 和 W90 处理均增加,增幅为 8.5%~18.0%,而其他处理均略有降低。施用保水剂各处理土壤有效磷和速效钾含量均显著高于试验处理前,而不施保水剂处理与试验处理前差异不显著。3 年土壤碱解氮含量各处理均低于试验处理前,施用保水剂 W60(除 2018 年外)和 W90 处理与试验处理前差异均不显著,而其他处理均显著低于试验处理前,这是由于秸秆还田后秸秆腐解消耗土壤中一定的氮素,导致土壤碱解氮含量明显下降。

秸秆还田条件下保水剂的保肥作用有助于有机质进行缓慢厌氧分解,从而有利于土壤保肥。2016 年,保水剂不同处理 0~40 cm 层土壤有机质含量均较对照明显增加,其中 W60、W90 和 W120 处理增幅高,分别较 CK 显著提高 42.2%、42.2% 和 33.8%。土壤碱解氮含量以 W60 和 W90 处理高,分别较 CK 显著增加 26.0% 和 18.6%。不同处理下土壤有效磷含量由高到低表现为 W60、W90、W120、W30、CK,而各处理下土壤速效钾含量由高到低则表现为 W60、W90、W30、CK、W120,均以 W60 和 W90 处理最为显著。2017、2018 年,秸秆还田配施保水剂各处理 0~40 cm 层土壤有机质、碱解氮含量均较对照明显增加,其中 W60 和 W90 处理最为显著。W60、W90 处理平均土壤有机质含量分别较 CK 显著提高 34.4% 和 25.3%,平均土壤碱解氮含量分别显著提高 52.0% 和 27.3%。不同处理下土壤有效磷含量两年由高到低均表现为 W60、W30、W90、W120、CK,W30、W60、W90 处理平均分别较 CK 显著提高 36.8%、45.5% 和 16.9%;土壤速效钾含量由高到低为 W60、W90、W30、W120、CK,W30、W60、W90 和 W120 处理平均分别较 CK 显著提高 14.3%、23.2%、24.5% 和 10.4%。可见,连续秸秆还田条件下增施保水剂能增加土壤有机质、有效磷和速效钾含量,一定程度上缓解对土壤氮素的消耗,提高土壤的保肥供肥能力,其中保水剂施用量 60 kg/hm² 和 90 kg/hm² 效果较好。

2.4 保水剂施用量对玉米生长的影响

施用保水剂能改善玉米不同生育期土壤的水肥状况,从而促进玉米的生长发育(表 3)。3 年研究期间,各处理下玉米生育期株高和茎粗均呈先升高后降低的变化趋势。2016 年,W60 和 W90 处理整个生育期玉米株高分别较 CK 显著增高 13.2% 和 12.1%,而 W30、W120 处理在拔节期和收获期与 CK 无显著差异。玉米茎粗在抽雄期达到最大,W30、W60、W90 处理整个生育期玉米茎粗分别较

CK 显著提高 10.7%、17.0% 和 11.3%。2017 年,各处理下玉米生育期株高和茎粗均呈先升高后降低的趋势。保水剂各处理玉米整个生育期株高和茎粗均显著高于对照,W30、W60、W90 和 W120 处理株高分别较 CK 增高 10.4%、18.9%、20.4% 和 13.7%,茎粗分别提高 7.0%、15.2%、18.6%、13.5%,其中 W60 和 W90 处理对玉米生长促进作用最为显著。2018 年,W60 和 W90 处理玉米生育期株高和茎粗均与 CK 差异显著,株高分别较 CK 显著提高 14.6% 和 14.8%,茎粗分别较 CK 显著提高 14.3% 和 12.2%。可见,W60 和 W90 处理与其他保水剂施用量处理相比,对提高玉米株高和茎粗的效果最为显著。

图 4 为不同保水剂施用量对玉米地上部生物量的影响。不同处理下玉米主要生育期地上部生物量呈逐渐上升的变化趋势,收获期达到最大。2016 年,W60 处理整个生育期玉米地上部生物量均显著高于 CK。拔节期,W60、W90 和 W120 处理分别较 CK 显著提高 70.8%、54.2%、43.8%;抽雄期,W60 处理较 CK 显著提高 76.8%;玉米吐丝期,W60 和 W90 处理分别较 CK 显著提高 41.3%、40.3%;灌浆期,W60 和 W90 处理分别较 CK 显著提高 71.5%、65.3%;收获期,W60、W90 和 W120 处理分别较 CK 显著提高 51.4%、48.2%、45.7%。2017 年,施用保水剂各处理地上部生物量与株高变化趋势一致,W60、W90 处理对玉米整个生育期地上部生物量影响最为显著,其次为 W120 和 W30 处理。W60 和 W90 处理、W30 和 W120 处理间差异不显著,但均显著高于 CK。W60、W90 处理平均玉米地上部生物量分别较 CK 显著提高 66.7% 和 58.3%,W30、W120 处理分别较 CK 显著提高 23.9% 和 45.0%。2018 年,在生育前期(拔节-抽雄期),由于植株较小,地上部生物量变化幅度不大。生育中后期(吐丝期以后),各处理地上部生物量快速增加,由大到小表现为 W60、W90、W120、W30、CK。收获期,W60 和 W90 处理分别较 CK 显著增加 13.1% 和 12.5%。可见,施用保水剂可促进玉米地上部生物量累积,其中以施用保水剂 60、90 kg/hm² 效果最佳。

2.5 保水剂施用量对玉米产量、水分利用效率及经济效益的影响

表 4 为不同保水剂施用量下玉米产量、水分利用效率与经济效益分析。秸秆还田条件下保水剂施用量不同,使玉米产量存在显著差异。2016 年,各处理玉米产量由高到低表现为 W60、W90、W30、W120、CK。施用保水剂各处理下玉米产量均高于对照,W30、W60 和 W90 处理玉米产量分别较 CK

表 3 保水剂施用量对玉米不同生育期株高和茎粗的影响

Tab.3 Effects of super absorbent polymer dosages on plant height and stem diameter at growing stage of maize											
年份	处理	拔节期		抽雄期		吐丝期		灌浆期		收获期	
		株高/cm	茎粗/mm	株高/cm	茎粗/mm	株高/cm	茎粗/mm	株高/cm	茎粗/mm	株高/cm	茎粗/mm
2016	CK	(38.4 ± 1.7) ^b	(13.63 ± 0.34) ^c	(138.7 ± 4.5) ^b	(21.30 ± 2.89) ^c	(229.3 ± 8.5) ^b	(21.70 ± 0.77) ^b	(223.8 ± 7.3) ^c	(20.06 ± 3.25) ^c	(228.3 ± 7.8) ^b	(20.29 ± 1.67) ^b
		(42.3 ± 1.4) ^{ab}	(15.70 ± 0.55) ^b	(149.0 ± 5.4) ^a	(24.60 ± 3.67) ^a	(245.0 ± 6.3) ^a	(23.30 ± 0.94) ^a	(233.5 ± 7.0) ^c	(21.90 ± 2.07) ^b	(228.0 ± 8.4) ^b	(21.82 ± 2.11) ^a
	W30	(48.5 ± 2.1) ^a	(17.30 ± 0.13) ^a	(161.2 ± 7.6) ^a	(25.82 ± 2.62) ^a	(247.5 ± 7.5) ^a	(23.76 ± 0.85) ^a	(259.5 ± 8.2) ^a	(23.54 ± 4.15) ^a	(255.5 ± 6.9) ^a	(23.03 ± 3.06) ^a
		(45.0 ± 3.2) ^a	(16.43 ± 0.82) ^{ab}	(158.7 ± 4.2) ^a	(25.03 ± 3.15) ^a	(249.0 ± 9.2) ^a	(23.66 ± 1.02) ^a	(260.0 ± 7.4) ^a	(23.11 ± 1.98) ^a	(249.5 ± 8.0) ^a	(19.74 ± 2.88) ^b
	W60	(44.3 ± 2.2) ^{ab}	(16.26 ± 0.54) ^{ab}	(158.0 ± 6.5) ^a	(23.62 ± 4.84) ^b	(254.0 ± 11.8) ^a	(23.00 ± 0.94) ^a	(246.5 ± 9.0) ^b	(21.56 ± 2.83) ^b	(244.0 ± 7.9) ^{ab}	(19.92 ± 1.69) ^b
	W90										
	W120										
	CK	(30.5 ± 1.8) ^c	(10.56 ± 0.68) ^b	(94.2 ± 5.5) ^b	(18.41 ± 3.71) ^c	(111.8 ± 8.3) ^d	(23.29 ± 0.88) ^c	(187.0 ± 6.4) ^b	(23.97 ± 3.06) ^b	(180.8 ± 8.0) ^b	(20.69 ± 2.24) ^d
		(39.8 ± 2.9) ^b	(12.61 ± 0.41) ^b	(98.0 ± 4.6) ^{ab}	(18.48 ± 3.79) ^c	(127.0 ± 10.0) ^{bc}	(24.96 ± 0.96) ^{ab}	(199.7 ± 7.9) ^b	(25.30 ± 2.99) ^a	(198.2 ± 7.9) ^b	(21.25 ± 3.72) ^{cd}
2017	W30	(46.6 ± 3.8) ^a	(15.27 ± 0.66) ^a	(107.8 ± 8.3) ^a	(20.89 ± 4.70) ^b	(141.1 ± 8.9) ^a	(25.82 ± 1.21) ^a	(212.8 ± 7.0) ^a	(26.15 ± 1.89) ^a	(210.3 ± 6.8) ^a	(22.32 ± 2.81) ^{bc}
		(44.8 ± 4.1) ^{ab}	(15.03 ± 0.50) ^a	(107.2 ± 7.4) ^a	(22.26 ± 4.44) ^a	(140.7 ± 9.6) ^a	(25.90 ± 0.96) ^a	(224.2 ± 8.0) ^a	(26.28 ± 3.46) ^a	(220.2 ± 8.9) ^a	(24.23 ± 3.63) ^a
	W60	(44.3 ± 2.2) ^{ab}	(14.55 ± 0.38) ^a	(102.7 ± 6.9) ^a	(21.19 ± 3.58) ^{ab}	(121.4 ± 7.6) ^{cd}	(24.71 ± 0.89) ^b	(210.3 ± 9.3) ^a	(25.69 ± 2.86) ^a	(203.7 ± 6.2) ^a	(22.72 ± 2.58) ^b
	W90										
	W120										
	CK	(45.7 ± 1.8) ^b	(11.31 ± 0.51) ^c	(120.7 ± 5.0) ^b	(22.31 ± 3.30) ^c	(247.3 ± 8.4) ^e	(20.32 ± 0.83) ^c	(269.6 ± 6.8) ^e	(21.04 ± 3.16) ^c	(270.6 ± 7.9) ^e	(21.08 ± 1.96) ^b
		(55.0 ± 2.0) ^{ab}	(13.37 ± 0.46) ^b	(124.0 ± 4.8) ^{ab}	(24.37 ± 3.55) ^b	(288.0 ± 7.8) ^a	(22.85 ± 0.95) ^a	(285.3 ± 7.5) ^a	(21.10 ± 2.53) ^c	(284.7 ± 8.2) ^{ab}	(21.57 ± 2.92) ^{ab}
2018	W30	(68.0 ± 1.1) ^a	(14.82 ± 0.40) ^a	(154.0 ± 8.0) ^a	(25.82 ± 3.68) ^a	(284.2 ± 8.3) ^a	(22.69 ± 1.04) ^a	(292.3 ± 7.6) ^a	(23.77 ± 3.04) ^a	(295.0 ± 6.9) ^a	(22.66 ± 2.94) ^a
		(69.1 ± 3.4) ^a	(14.72 ± 0.60) ^a	(153.7 ± 5.2) ^a	(25.72 ± 3.45) ^a	(286.3 ± 8.6) ^a	(21.97 ± 0.90) ^{ab}	(293.9 ± 7.0) ^a	(22.93 ± 2.47) ^b	(291.9 ± 7.7) ^a	(22.43 ± 2.96) ^a
	W60	(61.0 ± 2.2) ^a	(13.13 ± 0.46) ^b	(146.0 ± 6.7) ^a	(24.13 ± 4.21) ^b	(269.3 ± 9.8) ^b	(21.11 ± 0.93) ^b	(275.2 ± 9.3) ^b	(21.84 ± 2.89) ^b	(277.0 ± 7.1) ^b	(21.28 ± 2.17) ^b
	W90										
	W120										
	CK										
	W30										

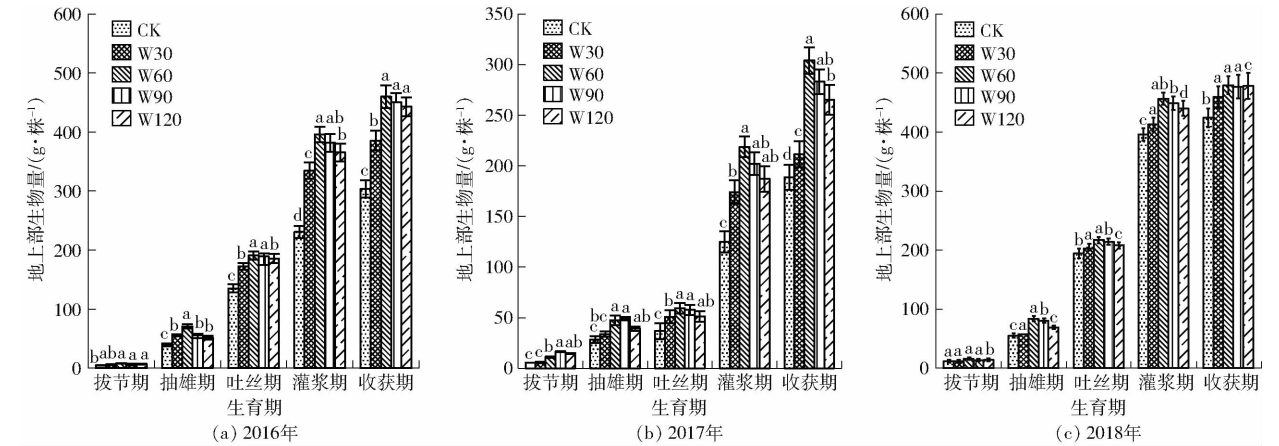


图 4 不同保水剂施用量对玉米地上部生物量的影响

Fig.4 Effects of super absorbent polymer dosages on aboveground biomass at growing stage of maize

显著提高 26.5%、41.8%、39.8%，而 W120 处理与 CK 差异不显著。2017 年，各处理玉米产量由高到低表现为 W60、W90、W120、W30、CK。W30、W60、W90 和 W120 处理玉米产量均显著高于 CK，而 W30、W90 和 W120 处理间无显著差异。W30、W60、W90 和 W120 处理玉米籽粒产量分别较 CK 显著提高 23.5%、34.5%、29.1% 和 20.3%，其中 W60 处理最为显著。2018 年，与 CK 相比，各保水剂处理增产幅度由高到低依次为 W60、W90、W30、W120，增产幅度显著，分别为 29.4%、23.8%、

表 4 不同保水剂施用量下玉米的产量、水分利用效率与经济效益
Tab.4 Yield and water use efficiency and economic benefit of maize under super absorbent dosages

年份	处理	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	耗水量/mm	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	投入/ (元·hm ⁻²)	产出/ (元·hm ⁻²)	纯收益/ (元·hm ⁻²)
2016	CK	(7 482.0 ± 347.2) ^c	(486.34 ± 12.60) ^a	(15.38 ± 1.14) ^c	2 500	(11 971.2 ± 472.6) ^d	(9 471.2 ± 398.2) ^c
	W30	(9 462.0 ± 276.4) ^b	(483.36 ± 14.54) ^a	(19.58 ± 2.10) ^b	3 400	(15 139.2 ± 526.1) ^b	(11 739.2 ± 457.6) ^{ab}
	W60	(10 612.5 ± 301.9) ^a	(466.90 ± 16.61) ^b	(22.73 ± 1.23) ^a	4 300	(16 980.0 ± 499.6) ^a	(12 680.0 ± 412.8) ^a
	W90	(10 456.5 ± 415.3) ^{ab}	(464.90 ± 12.92) ^b	(22.49 ± 3.58) ^a	5 200	(16 730.4 ± 512.3) ^{ab}	(11 530.4 ± 384.9) ^b
	W120	(8 521.5 ± 368.0) ^{bc}	(455.20 ± 13.23) ^b	(18.72 ± 2.19) ^b	6 100	(13 634.4 ± 422.4) ^c	(7 534.4 ± 382.6) ^d
2017	CK	(8 383.4 ± 315.8) ^c	(431.70 ± 14.53) ^a	(19.41 ± 2.14) ^d	2 500	(13 413.4 ± 389.0) ^c	(10 913.4 ± 342.8) ^c
	W30	(10 350.8 ± 384.0) ^b	(425.49 ± 12.26) ^{ab}	(24.33 ± 1.89) ^c	3 400	(16 561.3 ± 458.2) ^b	13 161.3 ± 414.5) ^b
	W60	(11 277.5 ± 308.1) ^a	(405.51 ± 10.42) ^c	(27.81 ± 2.52) ^a	4 300	(18 044.0 ± 474.6) ^a	(13 744.0 ± 426.3) ^a
	W90	(10 820.2 ± 391.6) ^b	(402.32 ± 13.68) ^c	(26.89 ± 2.86) ^b	5 200	(17 312.3 ± 388.7) ^b	(12 112.3 ± 323.4) ^b
	W120	(10 090.7 ± 298.8) ^b	(410.91 ± 11.73) ^{bc}	(24.56 ± 2.46) ^{bc}	6 100	(16 145.1 ± 436.4) ^b	(10 045.1 ± 411.6) ^c
2018	CK	(8 048.3 ± 213.5) ^c	(400.40 ± 10.45) ^a	(20.10 ± 1.99) ^c	2 500	(12 877.3 ± 459.3) ^c	(10 377.3 ± 419.3) ^b
	W30	(9 793.6 ± 272.6) ^b	(393.29 ± 10.42) ^b	(24.90 ± 2.44) ^b	3 400	(15 669.8 ± 470.4) ^b	(12 269.8 ± 441.2) ^a
	W60	(10 416.8 ± 146.7) ^a	(368.06 ± 9.34) ^c	(28.30 ± 0.91) ^a	4 300	(16 666.9 ± 342.7) ^a	(12 366.9 ± 375.5) ^a
	W90	(9 960.2 ± 172.2) ^b	(396.81 ± 10.42) ^b	(25.10 ± 1.56) ^b	5 200	(15 936.3 ± 487.4) ^b	(10 736.3 ± 436.8) ^b
	W120	(9 771.4 ± 138.4) ^b	(402.10 ± 12.24) ^a	(24.30 ± 1.16) ^b	6 100	(15 634.2 ± 329.3) ^b	(9 534.2 ± 394.4) ^c

注:投入包括种子化肥、保水剂及耕作处理人工费和滴灌材料费。种子肥料费平均 600 元/hm²,沃特多功能保水剂 3 年均为 30 元/kg,人工费均为 400 元/hm²,滴灌材料费均为 1 500 元/hm²。玉米售价平均 1.6 元/kg。

21.7%和21.4%。综合3年研究发现,秸秆还田条件下施用保水剂60、90 kg/hm²处理玉米的增产效果较好。

施用保水剂对作物耗水量和水分利用效率产生一定的影响(表4)。2016年,不同保水剂施用量下作物耗水量较对照降低0.6%~6.4%,其中W60、W90、W120处理作物耗水量较CK显著降低4.0%、4.4%、6.4%。各处理玉米水分利用效率由高到低依次为W60、W90、W30、W120、CK,W60处理的水分利用效率最高,与CK处理相比显著增加47.7%;其次为W90处理,较CK显著提高46.2%;W30、W120处理次之,其水分利用效率分别较CK显著提高27.2%、21.7%。2017年,保水剂各处理作物耗水量较对照显著降低1.4%~6.8%,其中W60、W90处理分别较CK显著降低6.1%、6.8%。各处理玉米水分利用效率由高到低依次为W60、W90、W120、W30、CK,W60处理的水分利用效率最高,较CK处理显著增加43.2%;其次为W90处理,较CK显著提高38.5%;W30、W120处理水分利用效率分别较CK提高25.3%、26.5%。2018年,W60处理玉米水分利用效率最高(28.30 kg/(hm²·mm)),其次为W90处理(25.10 kg/(hm²·mm)),分别较CK显著增加40.8%和24.9%;而W30和W120处理水分利用效率分别较CK显著提高23.9%、20.9%。

如表4所示,由于保水剂施用量的不同,不同处理的投入存在一定的差异。2016年,各处理投入由高到低依次为W120、W90、W60、W30、CK,而各处理

纯收益由高到低依次为W60、W30、W90、CK、W120。W60处理纯收益最高,W30和W90处理次之,W30、W60、W90处理纯收益分别较CK显著提高23.9%、33.9%、21.7%,而W120处理较CK显著降低20.4%。2017年各处理投入与2016年基本一致,各处理纯收益由高到低依次为W60、W30、CK、W90、W120。W60处理的纯收益最高,W30处理次之。W30、W60和W90处理的纯收益较CK显著提高20.6%、25.9%和11.0%,而W120处理较CK略有降低,但差异不显著。2018年,W60处理纯收益最高,W30处理次之,分别较CK显著提高28.6%、29.7%,而W120较CK处理显著降低8.8%。可见,结合考虑成本分析,保水剂施用量60 kg/hm²时,玉米增产增效最佳。

3 讨论

保水剂反复进行吸水膨胀、释水收缩这一过程可明显改善土壤的容重和孔隙度^[17]。白岗栓等^[18]研究表明,保水剂施用量为60 kg/hm²处理可显著降低0~20 cm和20~40 cm层土壤容重,而施用量为45、75 kg/hm²处理对土壤容重未产生显著影响。韩玉国等^[19]和李兴等^[20]研究报道,保水剂能够改善土壤孔隙度,并随保水剂浓度的增大,土壤孔隙度逐渐增加。本研究发现,施用保水剂能够降低0~40 cm层土壤容重,这是由于沃特多功能保水剂为有机-无机杂化保水剂,具有较高的吸水倍率和膨胀性能,穴施可降低表层土壤容重^[21]。然而,本研究

中当保水剂施用量超过 90 kg/hm^2 后对土壤容重和孔隙度改善的效果增加并不明显。究其原因这是由于过量施用保水剂会降低土壤孔隙度,减弱其通气性,施用保水剂并非越多越好,只有适量的保水剂才能改善土壤物理性状,而过量或低量施用保水剂均达不到最佳作用效果^[22-23]。有研究表明,保水剂能提高作物不同生育期土壤蓄水和持水能力,可较长时间抵御干旱,且保水剂在试验用量范围内($30 \sim 60 \text{ kg/hm}^2$)土壤贮水量随保水剂施用量的增加而增加^[24-25]。马征等^[16]研究认为,保水剂在玉米生长中后期的保水效果逐渐显现。在3年研究中,秸秆还田配施保水剂不同处理,其整个生育期 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 层平均土壤贮水量以保水剂施用量 $60 \sim 90 \text{ kg/hm}^2$ 保水效果较佳,这可能由于施用适宜用量的保水剂改善了表层土壤结构,有利于下层土壤水分的蓄存^[21]。

提文祥^[26]研究认为,施入保水剂后,土壤速效养分释放得到明显改善,达到缓释作用,具有保水保肥效果。王帅等^[27]研究发现,适量施用腐殖酸保水剂能在一定程度上缓解白浆土因玉米生长而导致土壤有机质和全氮含量的消耗程度。马焕成等^[28]研究表明,在森林土壤中增施保水剂可显著提高土壤中速效养分含量,使土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量显著提高。本研究结果表明,秸秆还田条件下施用保水剂能有效改善土壤肥力状况,同时一定程度上缓解有机质矿化分解及对土壤氮素的消耗,提高土壤的保肥和供肥能力,分析其原因是由于秸秆还田后施用保水剂能改善砂性土壤的理化性状^[13],促进秸秆向土壤有机质转化^[29],促进土壤养分的转化供应,保蓄土壤的有效养分^[30]。同时,在灌水施肥后,由于保水剂对土壤水分和养分的吸持能力,使保水剂层土壤养分含量明显升高^[31]。

在干旱砂性土中施用保水剂能在一定程度上缓解土壤缺水状况,保障作物的正常生长发育^[30]。刘世亮等^[32]研究认为,施用适宜浓度的松土保水剂可有效提高玉米株高、单株叶面积和生物量。吴阳生等^[33]报道,在吉林半干旱区,秸秆还田条件下施用保水剂有利于玉米生长发育,于明英等^[34]研究表明,保水剂可促进作物幼苗株高、叶片数、叶面积增加及干物质积累,当保水剂施用量为 90 kg/hm^2 时,作用最为显著。本研究发现,秸秆还田条件下施用保水剂可促进玉米生长,当保水剂施用量在 $60 \sim 90 \text{ kg/hm}^2$ 时效果较好。这是由于秸秆还田对土壤理化性质具有良好的调控作用^[35],施入适量保水剂既可发挥秸秆还田改善土壤孔隙结构,又能增强保水剂的保水保肥效果,促进作物的生长^[36],但保水剂施用量过低时其效果不明显,过高时反而抑制作

物的生长^[37]。

研究表明,在干旱缺水条件下,施用 45 kg/hm^2 保水剂 + 120 kg/hm^2 黄腐酸效果最好,其水分利用效率提高 90% ,玉米产量增加 50% ^[38]。保水剂与水混合用量为 1 kg/m^3 能促进小粒咖啡生长,水分利用效率最高,而当用量为 1.5 kg/m^3 时不利于干物质累积,水分利用效率也无明显提高^[39]。本研究结果表明,施用保水剂 $60 \sim 90 \text{ kg/hm}^2$ 时可显著提高玉米产量和水分利用效率。这是由于保水剂具有较强的吸释水和保肥的功能,可改善土壤的水肥环境,从而提高产量和水分利用效率^[40]。然而保水剂用量过大(120 kg/hm^2),会引起作物减产和水分利用效率降低,分析其原因:保水剂的最佳用量受土壤和作物种类等诸多因素影响,保水剂施量过多时,在干旱情况下易与作物争夺部分水分,从而使植株受干旱胁迫的程度相对较大,使得膜透性和膜损伤程度增大,影响产量的增加^[41-42]。在农业生产中合理施用保水剂,能起到节水、增产、提高土壤养分有效性的作用^[43],但因施用方式、施用时间及施用量的不同,其不同地区、土壤类型对改善土壤理化性质、作物生长、增产效果也不同^[21]。刘礼等^[44]研究认为,不同保水剂类型对玉米生长、产量及其构成因素的影响不同,均表现为钾离子性聚合物效果更优、非离子性聚合物次之、有机弱酸最弱,因此钾离子性聚合物可作为旱作春玉米田保水剂类型的最佳选择。邹超煜等^[45]根据不同作物施用保水剂的产值,建议干旱半干旱区推广应用保水剂应优先选择马铃薯、西瓜,干旱区应优先选择向日葵、玉米。本研究也发现,在秸秆还田和滴灌条件下施用保水剂(两年玉米苗期穴施和一年玉米播种期条施) 60 kg/hm^2 ,对砂性土能表现出水分和养分间较好的协同效应,促进玉米的生长发育,提高作物增产增收,对宁夏盐环定扬黄灌区春玉米田合理施用保水剂具有重要的现实指导意义。然而,半干旱偏旱区施用土壤保水剂对砂性土改良及玉米收益效应除与保水剂自身吸水保水特性相关,更重要的是保水剂对土壤的直接和间接效应,如改良土壤结构,以及保水剂施用方式对土壤水肥下移造成的植物根际水分、养分不均衡分布等,这还有待进一步研究。

4 结束语

秸秆还田配施保水剂能有效降低 $0 \sim 40 \text{ cm}$ 层土壤容重,改善土壤的孔隙状况,同时增加 $0 \sim 40 \text{ cm}$ 层土壤有机质和速效氮磷钾含量。施用保水剂 $60, 90 \text{ kg/hm}^2$ 处理对提高土壤的保肥供肥效果最佳,显著促进玉米生长。与不施保水剂相比,施用保

水剂 60 kg/hm²处理的玉米增产和水分利用效率提高效果最佳,保水剂 90 kg/hm²处理次之。结合 3 年砂性土改良和玉米收益分析,秸秆还田条件下配施保水剂 60 kg/hm²,可有效改善土壤保水保肥效果,促进玉米生长,实现玉米的增产增收,可在宁夏盐环定扬黄灌区玉米田推荐应用。

参 考 文 献

[1] 陈璐. 气候变化对宁夏中部干旱带玉米生产影响的模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
CHEN Lu. Simulation of the impact of climate change on maize production in the middle arid region in Ningxia[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2016. (in Chinese)

[2] 王永宏, 赵如浪, 赵健, 等. 引、扬黄灌区玉米高产田(≥15000kg/hm²)特征分析与实现途径[J]. 作物杂志, 2013(5): 108 – 113.
WANG Yonghong, ZHAO Rulang, ZHAO Jian, et al. Characteristics and key cultivation techniques of maize high yield plots in Yellow river irrigation areas of Ningxia[J]. Crops, 2013(5):108 – 113. (in Chinese)

[3] 王艳丽, 吴鹏年, 李培富, 等. 有机肥配施氮肥对滴灌春玉米产量及土壤肥力状况的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(8): 1230 – 1237.
WANG Yanli, WU Pengnian, LI Peifu, et al. Effects of organic manure combined with nitrogen fertilizer on spring maize yield and soil fertility under drip irrigation[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(8): 1230 – 1237. (in Chinese)

[4] CHEN X, HUANG L, MAO X Y, et al. A comparative study of the cellular microscopic characteristics and mechanisms of maize seedling damage from super absorbent polymers[J]. Pedosphere, 2017, 27(2): 274 – 282.

[5] CAO Y B, WANG B T, GUO H Y, et al. The effect of super absorbent polymers on soil and water conservation on the terraces of the Loess Plateau[J]. Ecological Engineering, 2017, 102: 270 – 279.

[6] 杨永辉, 武继承, 赵世伟, 等. 保水剂用量对农田生态系统碳足迹的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 126 – 131, 125.
YANG Yonghui, WU Jicheng, ZHAO Shiwei, et al. Impact of super absorbent polymers dosage on carbon footprint of farmland ecological system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 126 – 131, 125. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150419&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.019. (in Chinese)

[7] 白岗栓, 何登峰, 耿伟, 等. 不同保水剂对土壤特性及烤烟生长的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(10): 31 – 43.
BAI Gangshuan, HE Dengfeng, GENG Wei, et al. Effects of different super absorbent polymer on soil[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(10): 31 – 43. (in Chinese)

[8] LI X, HE J Z, LIU Y R, et al. Effects of super absorbent polymers on soil microbial properties and Chinese cabbage (*Brassica chinensis*) growth[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(4): 711 – 719.

[9] HEIDAR N, AHMAD A, ALI D. Investigating effects of poly acrylat potassium on qualitative characters of grape (*Vitis vinifera*) in North Khorasan of Iran[J]. Ecology, Environment and Conservation, 2014, 20(2): 651 – 655.

[10] 杨永辉, 吴普特, 武继承, 等. 复水前后冬小麦光合生理特征对保水剂用量的响应[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 116 – 123.
YANG Yonghui, WU Pute, WU Jicheng, et al. Response of photosynthetic parameters of winter wheat before and after re-watering to different rates of water-retaining agent[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 116 – 123. (in Chinese)

[11] LIAO R K, WU W Y, REN S M, et al. Effects of super absorbent polymers on the hydraulic parameters and water retention properties of soil[J]. Journal of Nanomaterials, 2016, 2016: 5403976.

[12] 田露, 刘景辉, 赵宝平, 等. 保水剂和微生物菌肥配施对旱作燕麦干物质积累、分配、转运和产量的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(9): 2996 – 3003.
TIAN Lu, LIU Jinghui, ZHAO Baoping, et al. Effects of combination of water-retaining agent and microbial fertilizer on dry matter accumulation, allocation, transportation, and yield of oat in rainfed farmland[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(9): 2996 – 3003. (in Chinese)

[13] ZHANG P, WEI T, JIA Z K, et al. Soil aggregate and crop yield changes with different rates of straw incorporation in semiarid areas of Northwest China[J]. Geoderma, 2014, 230: 41 – 49.

[14] 张万锋, 杨树青, 靳亚红, 等. 秸秆深埋下灌水量对土壤水盐分布与夏玉米产量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 228 – 237.
ZHANG Wanfeng, YANG Shuqing, JIN Yahong, et al. Effects of irrigation amount on soil water and salt distribution and summer maize yield under deeply buried straw[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 228 – 237. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210126&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.026. (in Chinese)

[15] HOU X Q, LI R, HE W S, et al. Super absorbent polymers influence soil physical properties and increase potato tuber yield in a dry-farming region[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(3): 816 – 826.

[16] 马征, 姚海燕, 张柏松, 等. 保水剂对粘质潮土团聚体分布、稳定性及玉米养分积累的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 221 – 226.
MA Zheng, YAO Haiyan, ZHANG Baisong, et al. Effects of different kinds of super absorbent polymers on distribution and stability of clay soil aggregates and nutrient accumulation by maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2):

- 221–226. (in Chinese)
- [17] 杜社妮, 耿桂俊, 于健, 等. 保水剂施用方式对河套灌区土壤水热条件及玉米生长的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 270–276.
DU Shen, GENG Guijun, YU Jian, et al. Effects of super absorbent applied by different methods on soil moisture, soil temperature and maize growth[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(5): 270–276. (in Chinese)
- [18] 白岗栓, 耿伟, 何登峰. 保水剂施用量对秦巴山区土壤特性及烤烟生长的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019, 45(3): 343–354.
BAI Gangshuan, GENG Wei, HE Dengfeng. Effects of super absorbent polymer with different application rates on soil characteristics and flue-cured tobacco growth in Qinba mountain area[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2019, 45(3): 343–354. (in Chinese)
- [19] 韩玉国, 范云涛, 赵鲁, 等. 施入保水剂土壤吸水膨胀试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 74–79.
HAN Yuguo, FAN Yuntao, ZHAO Lu, et al. Experiment on water-swelling property of soil with application of water retention agent[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 74–79. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121114&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.014 (in Chinese)
- [20] 李兴, 蒋进, 宋春武, 等. 不同粒径保水剂吸水特性及其对土壤物理性能的影响[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 609–614.
LI Xing, JIANG Jin, SONG Chunwu, et al. Water absorbent capacity of super absorbent polymer with different granularities and its effect on soil physical properties[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(4): 609–614. (in Chinese)
- [21] 侯贤清, 李荣, 何文寿, 等. 2种保水剂对旱作土壤物理性状及马铃薯产量的影响比较[J]. 核农学报, 2015, 29(12): 2410–2417.
HOU Xianqing, LI Rong, HE Wenshou, et al. Comparative effects of two super absorbent on soil physical properties of dryland and potato yield[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(12): 2410–2417. (in Chinese)
- [22] 许紫峻, 韩舒, 师庆东. 不同保水剂对土壤物理性质影响的探究[J]. 节水灌溉, 2016(10): 10–14.
XU Zijun, HAN Shu, SHI Qingdong. Effect of different super absorbent polymer on soil physical properties[J]. Water Saving Irrigation, 2016(10): 10–14. (in Chinese)
- [23] 王琰, 井大炜, 付修勇, 等. 保水剂施用量对杨树苗土壤物理性状与微生物活性的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 53–58.
WANG Yan, JING Dawei, FU Xiuyong, et al. Effects of application amount of super-absorbent polymer on soil physical characteristics and microbial activity under poplar seedlings[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 53–58. (in Chinese)
- [24] 张丽华, 边少锋, 孙宁, 等. 保水剂不同粒型及施用量对玉米产量和光合性状的影响[J]. 玉米科学, 2017, 25(1): 153–156.
ZHANG Lihua, BIAN Shaofeng, SUN Ning, et al. Effects of different grain size and amount of water retaining agent on yield and photosynthetic characteristics of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2017, 25(1): 153–156. (in Chinese)
- [25] 杨永辉, 吴普特, 武继承, 等. 保水剂对冬小麦不同生育阶段土壤水分及利用的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 19–26.
YANG Yonghui, WU Pute, WU Jicheng, et al. Impacts of water-retaining agent on soil moisture and water use in different growth stages of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 19–26. (in Chinese)
- [26] 提文祥. 保水剂对大豆生长发育的影响[J]. 大豆科技, 2011(4): 44–46.
TI Wenxiang. Effect of the application of drought-resistant agents on soybean growth[J]. Soybean Science & Technology, 2011(4): 44–46. (in Chinese)
- [27] 王帅, 姚凯, 陈殿元, 等. 腐殖酸保水剂用量对白浆土养分及玉米产量性状的影响研究[J]. 玉米科学, 2018, 26(1): 149–153.
WANG Shuai, YAO Kai, CHEN Dianyuan, et al. Properties of corn yield and albic soil nutrient affected by the dosages of humic acid water-retaining agent[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(1): 149–153. (in Chinese)
- [28] 马焕成, 罗质斌, 陈义群, 等. 保水剂对土壤养分的保蓄作用[J]. 浙江林学院学报, 2004, 21(4): 404–407.
MA Huancheng, LUO Zhibin, CHEN Yiqun, et al. Hydrogel's role in retention of nutrients in soil[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2004, 21(4): 404–407. (in Chinese)
- [29] 赵金花, 张丛志, 张佳宝. 激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 438–449.
ZHAO Jinhua, ZHANG Congzhi, ZHANG Jiabao. Effect of straw returning via deep burial coupled with application of fertilizer as primer on soil nutrients and winter wheat yield[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(2): 438–449. (in Chinese)
- [30] 侯贤清, 李荣, 何文寿, 等. 保水剂施用量对旱作土壤理化性质及马铃薯生长的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 325–330.
HOU Xianqing, LI Rong, HE Wenshou, et al. Effects of super absorbent dosages on physicochemical properties of dryland soil and potato growth[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 325–330. (in Chinese)
- [31] HAYAT R, ALI S. Water absorption by synthetic polymer (Aquasorb) and its effect on soil properties and tomato yield[J]. International Journal of Agriculture & Biology, 2004, 6(6): 998–1002.
- [32] 刘世亮, 寇太记, 介晓磊, 等. 保水剂对玉米生长和土壤养分转化供应的影响研究[J]. 河南农业大学学报, 2005, 39(2): 146–150.
LIU Shiliang, KOU Taiji, JIE Xiaolei, et al. Studies on the effects of water retaining agents on maize growth and soil nutrient transformation[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2005, 39(2): 146–150. (in Chinese)

- [33] 吴阳生, 王天野, 王呈玉, 等. 施用保水剂对半干旱地区玉米生长发育的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(增刊): 64–68.
WU Yangsheng, WANG Tianye, WANG Chengyu, et al. Effect of water retaining agent on growth and development of maize in semi-arid area[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(Supp.): 64–68. (in Chinese)
- [34] 于明英, 晏清洪, 肖娟, 等. 保水剂对基质育苗及沙培小油菜生长的影响[J]. 节水灌溉, 2018(1): 30–32, 37.
YU Mingying, YAN Qinghong, XIAO Juan, et al. Effect of SAP on growing seedlings in substrate and growth of rape in sand[J]. Water Saving Irrigation, 2018(1): 30–32, 37. (in Chinese)
- [35] LOU Y L, XU M G, WANG W, et al. Return rate of straw residue affects soil organic C sequestration by chemical fertilization[J]. Soiland Tillage Research, 2011, 113(1): 70–73.
- [36] 雷锋文, 符颖怡, 廖宗文, 等. 保水剂构件的保水保肥效果研究[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 151–155.
LEI Fengwen, FU Yingyi, LIAO Zongwen, et al. Effects of water pad on fertilizer and water saving[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 151–155. (in Chinese)
- [37] 李海燕, 张芮, 王福霞. 保水剂对注水播种玉米土壤水分运移及水分生产效率的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 37–42.
LI Haiyan, ZHANG Rui, WANG Fuxia. Effects of water-retaining agent on soil water moverment and water use efficiency of maize sowed with absolved water-storing irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 37–42. (in Chinese)
- [38] 张蕊, 于健, 耿桂俊, 等. PAM 施用方式对土壤水热及玉米生长的影响[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(3): 96–103.
ZHANG Rui, YU Jian, GENG Guijun, et al. Effects of PAM with different application methods on soil moisture, soil temperature and growth of *Zea mays*[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(3): 96–103. (in Chinese)
- [39] GUO Shiwen, LI Pinfang, LU Liang, et al. Maize (*Zea mays*) growth, water consumption and water use efficiency by application of a super absorbent polymer and fulvic acid under two soil moisture conditions[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(1): 1–11.
- [40] 刘小刚, 耿宏焯, 程金焕, 等. 保水剂和灌水对小粒咖啡苗木的节水调控效应[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 134–139.
LIU Xiaogang, GENG Hongzhuo, CHENG Jinhuan, et al. Effect of super absorbent polymer and irrigation on improving water use efficiency of arabica coffee seedling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 134–139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140323&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.02. (in Chinese)
- [41] YAZDANI F, ALLAHDAI I, AKBARI G A. Impact of super absorbent polymer on yield and growth analysis of soybean (*Glycine max* L.) under drought stress condition[J]. Pakistan Journal Biologic Science, 2007, 10(23): 4190–4196.
- [42] 穆俊祥, 曹兴明, 刘拴成. 保水剂和氮肥配施对马铃薯生长和水肥利用的影响[J]. 河南农业科学, 2016, 45(9): 35–40.
MU Junxiang, CAO Xingming, LIU Shuancheng. Effects of combined application of water-retaining agent and nitrogen fertilizer on growth and water and fertilizer utilization of potato[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(9): 35–40. (in Chinese)
- [43] 魏琛琛, 廖人宽, 王瑜, 等. 保水剂吸释水分与养分动力学规律研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 275–284.
WEI Chenchen, LIAO Renkuan, WANG Yu, et al. Kinetics law of absorption and release of water and nutrients by super absorbent polymers[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 275–284. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190130&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.030. (in Chinese)
- [44] 刘礼, 孙东宝, 王庆锁. 不同保水剂对旱地春玉米生长发育和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(3): 262–268.
LIU Li, SUN Dongbao, WANG Qingsuo. Effects of different water-retention agents on yield and growth of dryland spring maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(3): 262–268. (in Chinese)
- [45] 邹超煜, 白岗栓, 于健, 等. 保水剂对不同作物水分利用效率及产值的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(5): 66–73.
ZOU Chaoyu, BAI Gangshuan, YU Jian, et al. Effects of super absorbent polymer on water use efficiency and output value of different crops in different regions[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(5): 66–73. (in Chinese)