

长期施用保水剂对小麦生长和水分利用的影响

康永亮^{1,3}, 武继承^{2,3}, 郑惠玲⁴, 杨永辉^{2,3}, 潘晓莹^{2,3}, 田志浩¹

(1. 禹州市农业技术推广中心, 河南 禹州 461670; 2. 河南省农业科学院 植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002; 3. 农业部 作物高用水原阳科学观测试验站, 河南 原阳 453514; 4. 河南省土壤肥料站, 河南 郑州 450008)

摘要: [目的] 开展保水剂长期施用对作物增产和水分利用效率的研究, 为探索浅山丘陵旱作区资源利用效率和生产效率的关键提升技术提供科学依据。[方法] 采取田间定位试验的方法于2011—2019年在河南省农科院节水农业禹州基地进行了不同保水剂用量对小麦产量与水分利用的影响研究。试验设置未施保水剂(CK)、保水剂 15 kg/hm²(F)、保水剂 30 kg/hm²(T)、保水剂 45 kg/hm²(V)等4个处理。[结果] ①同一年份施用保水剂处理随小麦生长发育土壤耗水量略有增加, 各处理表现为: V>T>F>CK; 不同年份之间, 贫水年土壤耗水量相对较大, 富水年增减不一, 表现为: 2019年>2014年>2015年>2011年>2012年>2016年>2018年>2013年>2017年。②小麦总耗水量与生育期降水量趋势基本一致, 即不同年份之间丰水年小麦总耗水量较大, 贫水年总耗水量较小。③施用保水剂处理有利于改善小麦生长发育, 提高单位群体数量、株高、穗长、小穗数、穗粒数和千粒质量, 减少不孕穗。④小麦产量表现为: V>T>F>CK, 保水剂处理较CK增产2.31%~19.20%。随着施用年限延长, F处理至第4a后对小麦的增产幅度趋于稳定, T处理的增产率随施用年限的增加逐步提升, V处理则表现为先增再减再逐步提高的过程。⑤单位净收益、水分利用效率与产量的趋势一致。水分利用效率不同年份间表现为先降低再升高(2012—2016年), 再降低再升高(2017—2019年)的过程。与土壤耗水量变化趋势一致, 与贫水年降水量、总耗水量的变化趋势相反。并以V处理的水分利用效率提高幅度最大, 较CK提高1.70~4.51 kg/(hm²·mm)。⑥小麦产量、水分利用效率、土壤耗水量、总耗水量之间呈显著的正相关关系。[结论] 基于不同降水年型、小麦产量、水分利用效率、净收益等综合考虑, 小麦最佳的保水剂用量为45 kg/hm²。

关键词: 保水剂; 小麦; 水分利用; 长期施用; 旱地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)04-0083-08

中图分类号: S152.7

文献参数: 康永亮, 武继承, 郑惠玲, 等. 长期施用保水剂对小麦生长和水分利用的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 83-90. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.04.012; Kang Yongliang, Wu Jicheng, Zheng Huiling, et al. Effects of long-term application of water absorbent on winter wheat growth and water use efficiency [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 83-90.

Effects of Long-term Application of Water Absorbent on Winter Wheat Growth and Water Use efficiency

Kang Yongliang^{1,3}, Wu Jicheng^{2,3}, Zheng Huiling⁴, Yang Yonghui^{2,3}, Pan Xiaoying^{2,3}, Tian Zhihao¹

(1. Yuzhou Agricultural Technology Extension Center, Yuzhou, He'nan 461670, China;

2. Institute of Plant Nutrition & Resource Environment, He'nan Academy of Agricultural Sciences,

Zhengzhou, He'nan 450002, China; 3. Yuanyang Experimental Station of Crop Water Use, Ministry of

Agriculture, Yuanyang, He'nan 453514, China; 4. He'nan Station of Soil and Fertilizer, Zhengzhou, He'nan 450008, China)

Abstract: [Objective] The effects of long-term application of water absorbent on crop yield and water use efficiency were investigated in order to provide scientific basis for exploring the key technologies to improve

收稿日期: 2020-04-17

修回日期: 2020-05-06

资助项目: 国家重点研发计划项目“豫中补灌区小麦水肥一体化技术与示范”(2018YFD0300703), “小麦—玉米两熟制水肥一体化关键技术”(2017YFD0301102); 国家863计划项目“作物生境过程土肥联合调控技术研究与示范”(2013AA102904-2)

第一作者: 康永亮(1963—), 男(汉族), 河南省禹州市人, 大学专科, 高级农艺师, 主要从事旱作节水农业技术与推广应用。Email: yuzhoukyl@163.com。

通讯作者: 武继承(1965—), 男(汉族), 河南省通许县人, 博士, 研究员, 主要从事节水农业、水肥一体化、植物营养与农业生态方面的研究工作。Email: wujc2065@126.com。

the resource use and production efficiency in dryland of shallow hilly regions. [Methods] Field experiment was conducted in Yuzhou base of He'nan Academy of Agricultural Sciences from 2011 to 2019, to study the effects of different amounts of water absorbent on winter wheat yield and water use efficiency. Four treatments were set up including no water absorbent (CK), 15 kg/hm² (F), 30 kg/hm² (T), and 45 kg/hm² (V) water absorbent. [Results] ① The soil water consumption increased slightly with winter wheat growth and development of wheat under the application of water absorbent in the same year, and the soil water consumption showed as: V>T>F>CK. In different years, the soil water consumption in the poor water years was relatively larger, and the increase and decrease in the rich water years was different as follows: 2019>2014>2015>2011>2012>2016>2018>2013>2017. ② The trend of total water consumption of wheat was basically consistent with that of precipitation in growth period, and the total water consumption of wheat in wet year was larger than that in poor water years. ③ The application of water absorbent treatment was beneficial to improve the growth and development of wheat, which could increase the number of unit population, plant height, spike length, spikelet number, grain number per spike and 1 000-grain weight, and reduce sterility. ④ The yield of winter wheat was as follows: V>T>F>CK. The yield of water absorbent treatments was 2.31% to 19.20% higher than that of CK. With the extension of the application years, the yield increase of treatment F tended to be stable after 4 years. The yield increase rate of treatment T increased gradually with the increase of application years, while that of V treatment increased first and then decreased and then increased gradually. ⑤ The net income and water use efficiency of winter wheat had the same tendency with the yield. Water use efficiency showed a process of decreasing first, then increasing (2012—2016), then decreasing and then increasing (2017—2019). It was consistent with the trend of soil water consumption, while opposite to the trend of precipitation and total water consumption in the poor water years. Compared with CK, the water use efficiency of V treatment increased by 1.70~4.51 kg/(hm²·mm). ⑥ There was a significant positive correlation among wheat yield, water use efficiency, soil water consumption and total water consumption. [Conclusion] Based on the comprehensive consideration of different precipitation types, wheat yield, water use efficiency and net income, the optimal amount of water absorbent for winter wheat is 45 kg/hm².

Keywords: wheat; water absorbent; water use; long-term application; dryland

干旱缺水是我国农业绿色持续发展的重要限制因素。尤其在在我国北方浅山丘陵区的旱作区,降水为解决农作物季节性干旱问题的主要水源,如何提高有限降水和土壤水分资源的利用效率,调控缺水时期的土壤水分和降水在土壤中的存留时间是提高旱地作物水分利用效率的关键问题。

保水剂是一种高分子聚合物^[1-2],能够改善土壤的结构^[3],促进团粒形成^[4]。保水剂被称为“微型土壤水库”,在水分充足条件下能够吸收数百倍甚至上千倍的水分^[5],在土壤干旱缺水条件下,迅速为作物提供水分。因此,保水剂的应用是现代农业节水中的一项重要措施^[6],也是旱作节水农业研究的热点^[7-10]。

研究表明,施用保水剂可以改善小麦根系活力及其生理特性^[11-12],提高土壤持水特性和供水能力^[13-15],调节土壤孔隙度^[16]及土壤团聚体结构特性^[17-18],增强土壤微生物活性^[19],激发作物生长发

育^[20],光合作用^[21],从而实现作物产量^[22-24]及降水与水分利用效率^[25-26]的共同提高。

目前保水剂对作物的增产效应研究多集中于短期研究,而对于保水剂长期应用后对作物产量及水分利用效率的研究还鲜见报道。因此,本文借助国家科技支撑计划和国家重点研发项目,开展保水剂长期施用对作物增产和水分利用效率的研究,旨在为解决浅山丘陵旱作区资源利用效率和生产效率的关键技术提供参考。

1 试验材料与方法

试验安排在河南省农科院节水农业禹州试验基地的岗旱地,年降水量 674 mm,其中 60%以上集中在夏季,存在较严重的春旱、伏旱和秋旱;土壤为壤质褐土,土壤母质为黄土性物质,耕层土壤有机质 14.2 g/kg,全氮 0.87 g/kg,水解氮 87.2 mg/kg,速效磷 12.4 mg/kg,速效钾 124.3 mg/kg。主要种植模式为小麦—玉米两熟制。

试验用保水剂为河南省农科院自主研发的营养型抗旱保水剂,吸水倍数为168,营养成分 $\geq 5\%$,试验设置4个处理:①未施保水剂(CK,下同);②保水剂 15 kg/hm^2 (F);③保水剂 30 kg/hm^2 (T);④保水剂 45 kg/hm^2 (V)等4个处理。小区面积 $3.6\text{ m}\times 4\text{ m}=14.4\text{ m}^2$,重复3次,随机排列。

试验用小麦品种为矮抗58,播种量 210 kg/hm^2 ,播种日期为每年的10月15—18日,收获日期为每年的5月29—31日。水肥管理、病虫害管理、农田管理措施保持一致,氮磷钾配比为210:90:90,其中氮肥底追比为70%:30%,磷钾肥随耕作1次施入,保水剂随底肥条施。根据土壤墒情变化情况,小麦返青到灌浆期土壤含水量低于7%时进行适量补灌,补灌量为30~60 mm/次。

土壤水分观测采用重量烘干法与远程水分监测仪相互校正的方法获得,降水量采用试验所在地天圪自动气象观测数据和禹州市气象观测站数据,小麦生育

期降水量采用10月上旬到次年5月份下旬小麦收获时的降水量。水分利用效率为经济产量除以总耗水量,总耗水量为生育期降水量+灌水量+土壤耗水量。

2 结果与分析

2.1 降水和土壤水分消耗的时空变化特征

由图1可以看出,土壤耗水量在生育期内同年份变化不大,但不同年份之间有一定的差异。同年份不同处理土壤耗水量表现为: $V>T>F>CK$ 。与CK相比,V处理土壤耗水量增加6.13~9.80 mm,T处理土壤耗水量增加4.31~7.57 mm,F处理土壤耗水量增加2.14~4.09 mm。

不同年份之间,从年度降水量看(见图2),2011,2015和2017年为富水年,2012年为平水年,其他年份为贫水年。但生育期则表现为2012,2014,2015,2017和2018年为富水年,2019年为极端贫水年,2011为贫水年,其他年份为平水年。

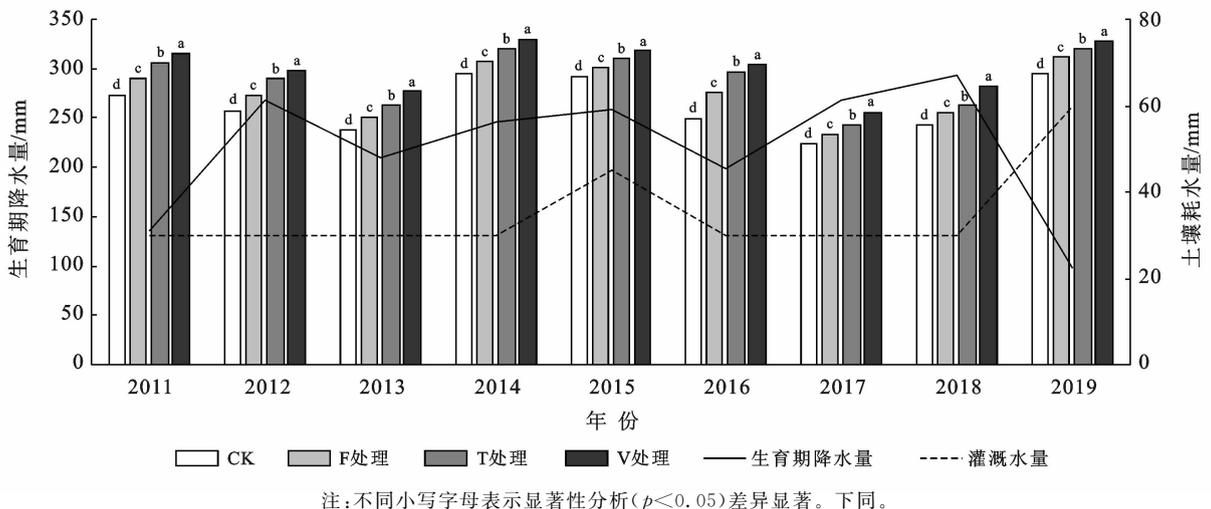


图1 小麦生育期内研究区土壤耗水量与降水量的变化特征

相对于平水年而言,贫水年的土壤耗水量相对较大,如2011和2019年;富水年因为小麦长势不一土壤耗水量有很大差异,如2017年,2018年耗水量明显降低,2012年略有降低,但2014和2015年耗水量显著增加(图1)。

小麦生育期降水量在不同年份之间表现为:2018年 $>$ 2012年 $>$ 2017年 $>$ 2015年 $>$ 2014年 $>$ 2013年 $>$ 2016年 $>$ 2011年 $>$ 2019年,土壤耗水量表现为2019年 $>$ 2014年 $>$ 2015年 $>$ 2011年 $>$ 2012年 $>$ 2016年 $>$ 2018年 $>$ 2013年 $>$ 2017年。总之,降水缺少,补水量不足时,土壤水分消耗量增大;降水丰足,空气湿度大,适量补水,土壤水分消耗量降低。

2.2 保水剂对小麦生长发育的影响

从图3可以看出,施用保水剂处理有利于改善小麦生长发育,提高单位群体数量、株高、穗长、小穗数、穗粒数和千粒质量,降低不孕穗。其中不同生育期群体动态表现为从播种期到返青期逐步升高,然后逐步下降,至抽穗期后趋于稳定的变化趋势,成熟期成穗数分别达到5535~5940万穗($n=9$),较CK增加3.67~6.67万穗。

与CK相比,小麦株高增加1.8~5 cm,穗长增长0.1~0.3 cm,小穗数增加0.3~1.1个,穗粒数增加1.9~5.7粒,千粒质量增加2.2~4.5 g,均以V处理表现最佳;不孕穗分别降低0.5~1.6个,以F处理减

低最多。从而为小麦产量与有效水分资源利用效率的提高奠定了基础。

2.3 保水剂对小麦产量与增产率的影响

从图 4 可以看出,保水剂的应用对小麦产量提高具有积极效果,其中 V 处理表现最佳,其次为 T 处理,并表现为:V>T>F>CK。随着施用年限的变

化,每年的产量水平差异也很大,与初始试验年 2011 年相比,2015,2019 和 2014 年的小麦产量处于前 3 位;而 2013 和 2017 年受气候、病虫害的影响产量低于初始试验年 2011 年小麦产量,不同年份之间表现为:2015 年>2019 年>2014 年>2012 年>2016 年>2018 年>2011 年>2013 年>2017 年。

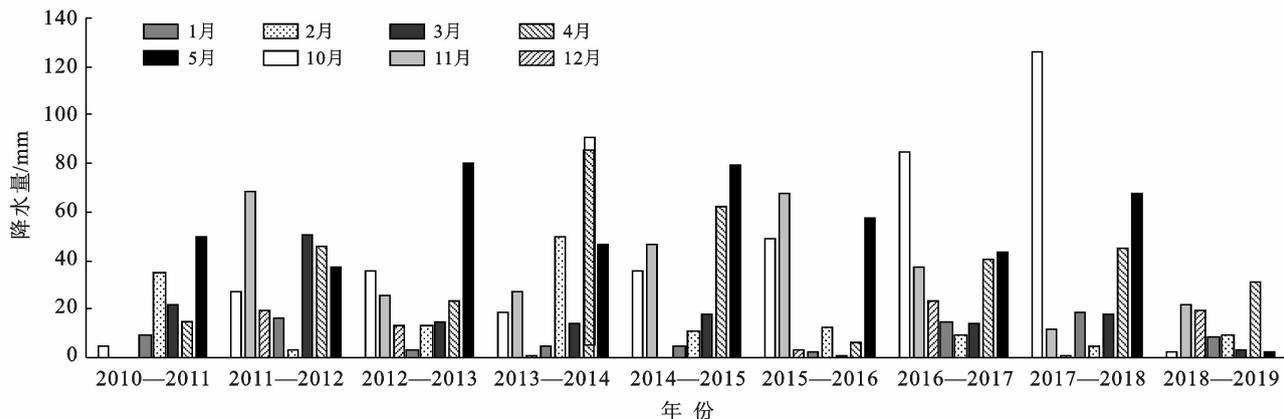


图 2 研究区小麦生育期降水特征

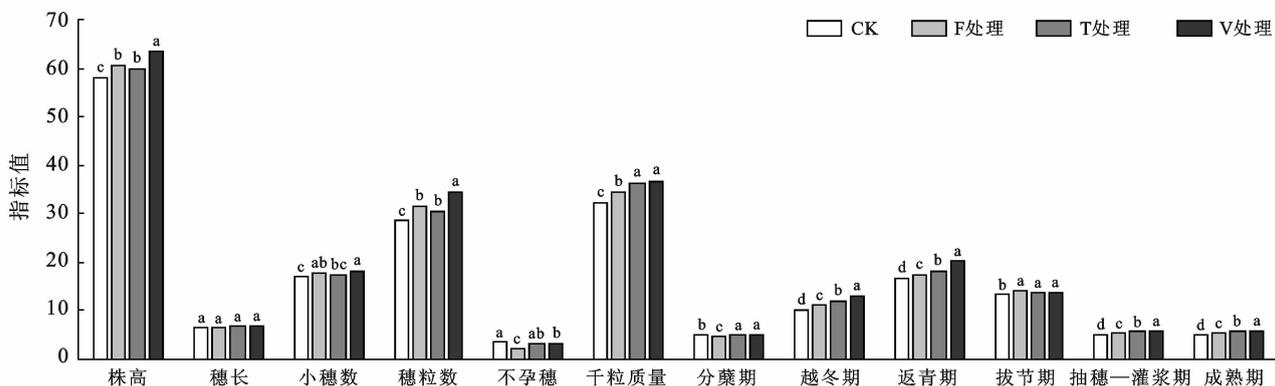


图 3 施用保水剂对研究区小麦生长发育的影响

小麦增产率与产量的变化趋势一致。CK 相比,保水剂用量处理增产幅度达到 2.31%~19.20%,以 V 处理平均增幅最高达到 15.52%($n=9$),T 处理平均增幅 11.12%,F 处理平均增幅 7.03%。但不同保水剂处理随着施用年限的延长,其增产趋势有着明显的不同(见图 5),其中 F 处理至第 4 a(2014 年)后对小麦的增产幅度上下差别变小,均在 8%以上,上下增幅小于 0.3%;T 处理对小麦产量的增产率随施用年限的增加逐步提升,至 2019 年增产幅度达到 14.48%;V 处理则表现为先增再减再增,再减再逐步提高的过程,即从最初的增产幅度 19.20%,下降到第 2 a(2012 年)的 11.50%,在逐步提升到第 4 a(2014 年)的 17.52%,然后逐步下

降到第 6 a(2016 年)的 13.07%,在逐步提升到 2019 年的 18.02%。因为不同保水剂用量的土壤持水能力和供水能力有一定的差异^[13-14],同时不同保水剂用量对土壤结构改良的作用也不相同^[17],保水剂低用量的田间持水能力和供水能力较低、对土壤结构改良的影响较小,稳定性较短;保水剂高用量的田间持水能力和供水能力较高、对土壤结构的改良影响较大、持续时间较长。同时,不同保水剂用量影响小麦根系生长^[12]和生理特性^[11,20],从而影响其抗旱性能的差异。而且不同年份增产率的差异说明保水剂对小麦的增产作用在一定程度上尚受气候的影响还比较大,其持续增产效果尚有待于进一步研究。

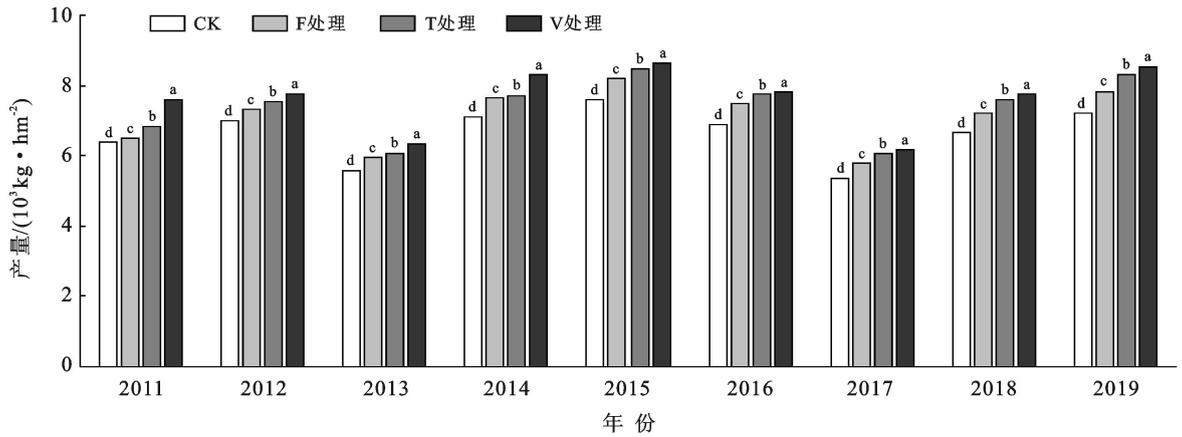


图 4 施用保水剂对研究区小麦产量的影响

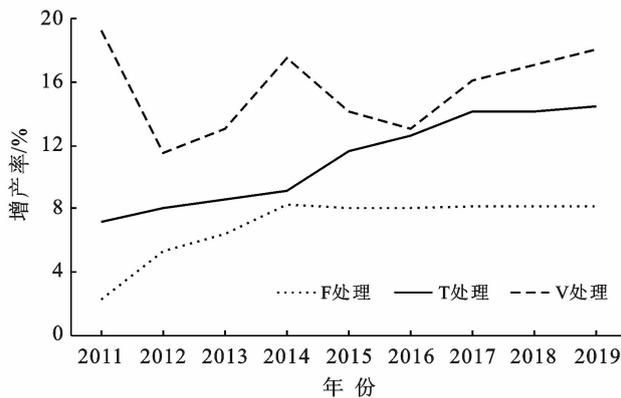


图 5 施用保水剂对研究区小麦增产率的影响

小麦产量、水分利用效率、土壤耗水量、总耗水量之间的相关性分析表明(表 1),小麦产量与水分利用效率、土壤耗水量和总耗水量呈正相关关系,水分利用效率与产量、土壤耗水量和总耗水量也呈正相关关系。因此,小麦产量、增产率、水分利用效率的高低与土壤耗水量、总耗水量密切相关。

表 1 研究区小麦产量、水分利用效率、土壤耗水量、总耗水量之间的相关性分析

项目	产量	水分利用效率 UE	土壤耗水量	总耗水量
产量	1			
水分利用效率	1.000**	1		
土壤耗水量	0.998**	0.996**	1	
总耗水量	0.998**	0.996**	1.000**	1

注: ** 表示在 0.01 水平显著相关。

2.4 保水剂对水分利用率的影响

从图 6—7 可以看出施用保水剂处理的耗水量有明显增加,小麦水分利用效率也显著提高,不同处理

间土壤耗水量和水分利用效率均表现为:V>T>F>CK,但不同年份之间有明显的差异。与 CK 相比,V 处理总耗水量增加 6.13~12.72 mm,T 处理总耗水量增加 4.31~10.76 mm,F 处理总耗水量增加 2.14~6.40 mm。小麦总耗水量则表现为:2018 年>2015 年>2012 年>2014 年>2017 年>2013 年>2016 年>2011 年>2019 年,并与生育期降水量趋势基本一致,即不同年份间丰水年小麦总耗水量较大、贫水年总耗水量较小。

小麦水分利用效率则表现为先降低再升高(2012—2016 年),再降低再升高(2017—2019 年)的过程。小麦水分利用效率与土壤耗水量变化趋势基本一致,与贫水年的降水量和耗水量的变化趋势相反,即相对缺水年份水分利用效率较高,富水年作物耗水量过大,水分利用效率相对较低。与 CK 相比,V 处理的水分利用效率提高幅度最大,分别提高 1.70~4.51 kg/(hm²·mm),其次为 T 处理,分别提高了 1.06~3.71 kg/(hm²·mm),F 处理提高幅度较小,分别提高 0.4~2.02 kg/(hm²·mm),均以 2019 年提高幅度最大。总之,施用保水剂增加了小麦水分消耗,提高了小麦水分利用效率。

小麦种植使用的肥料、种子、农药、耕地、播种、拌种、收获和小麦收购价格均按当年价格计算,通过单位投入产出进一步分析表明(见图 8),不同保水剂单位净收益均较对照有显著提高,并表现为:V>T>F>CK。

与 CK 相比,F 处理起始年降低 20.13 元/hm²,其他年份增加 450.83~1 144.42 元/hm²,平均增加 767.39 元/hm²,表现为:2015 年>2014 年>2019 年>2016 年>2018 年>2017 年>2013 年>2012 年>2011 年;T 处理增加 276.09~1 748.28 元/hm²,平

均增加 1 077.60 元, 表现为: 2019 年 > 2018 年 > 2015 年 > 2016 年 > 2017 年 > 2014 年 > 2012 年 > 2013 年 > 2011 年; V 处理增加了 720.65~2 051.91

元/hm², 平均增加了 1 413.09 元/hm², 表现为: 2014 年 > 2019 年 > 2018 年 > 2015 年 > 2011 年 > 2016 年 > 2017 年 > 2013 年 > 2012 年。

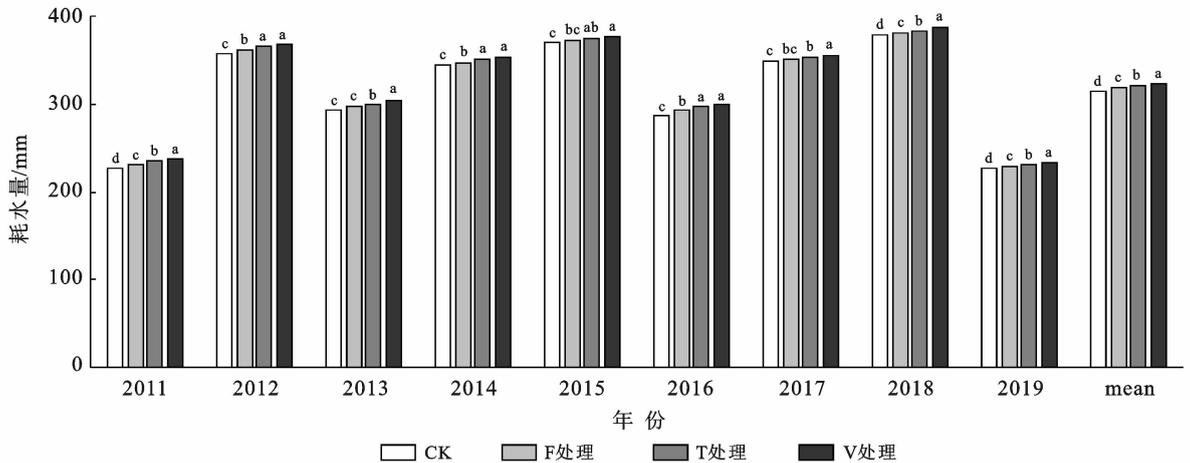


图 6 保水剂对研究区小麦耗水量的影响

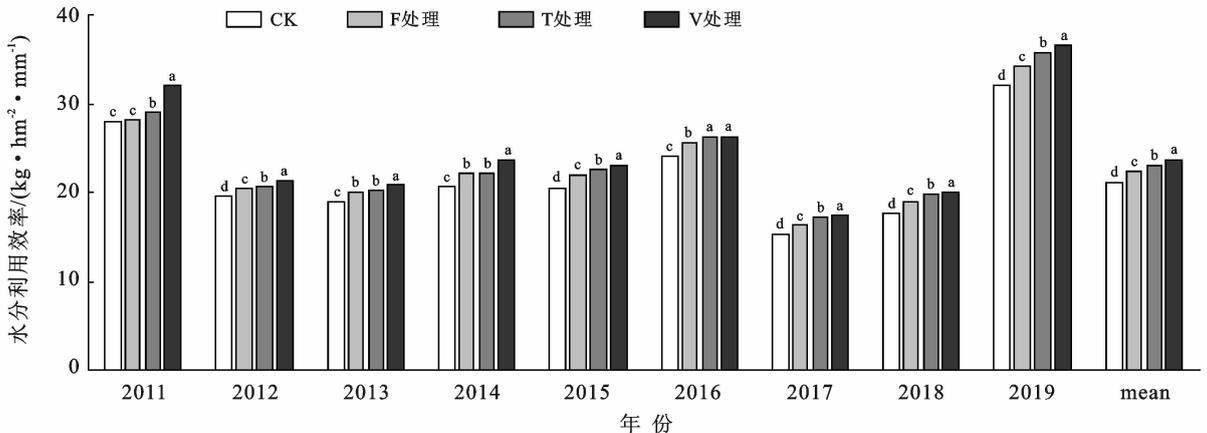


图 7 保水剂对研究区小麦水分利用效率的影响

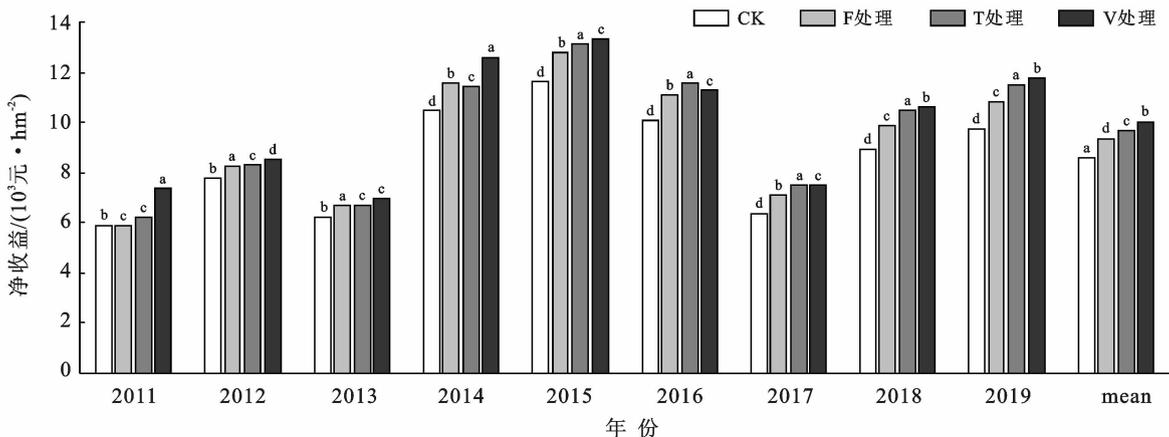


图 8 保水剂对研究区单位净收入的影响

3 结论和讨论

施用保水剂及其不同用量可以显著提高小麦产量和水分利用效率^[22-29], 是因为施用保水剂可以提高

土壤持水能力和供水能力^[13-15], 促进根系生长^[12,28], 改善小麦生长发育与生理特性^[20,29], 提高光合性能^[21,30]。本研究则进一步揭示了长期施用保水剂小麦土壤耗水量、总耗水量、水分利用率及其不同用量

增产率的变化特征。

(1) 施用保水剂处理有利于改善小麦生长发育,提高单位群体数量、株高、穗长、小穗数、穗粒数和千粒质量,降低不孕穗。与CK相比,成熟期小麦成穗数分别增加3.67~6.67万穗,株高增加1.8~5 cm,穗长增长0.1~0.3 cm,小穗数增加0.3~1.1个,穗粒数增加1.9~5.7粒,千粒质量增加2.2~4.5 g,不孕穗分别降低0.5~1.6个。该试验结果与杨永辉等^[4,12]、武继承等^[22,24]的研究结果一致,并以保水剂用量45 kg/hm²最佳^[21,24-25],在用量效果上,与不同保水剂用量的效果有一定的差异^[15,30]。

(2) 同一年份施用保水剂处理随小麦生长发育土壤耗水量略有增加。不同处理间土壤耗水量表现为:V>T>F>CK。与CK相比,V处理增加了6.13~9.80 mm,T处理增加了4.31~7.57 mm,F处理增加了2.14~4.09 mm。不同年份之间,贫水年的土壤耗水量相对较大,富水年因为小麦长势不一,土壤耗水量有很大差异,表现为:2019>2014>2015>2011>2012>2016>2018>2013>2017。小麦总耗水量则表现为:2018>2015>2012>2014>2017>2013>2016>2011>2019,并与生育期降水量趋势基本一致,即不同年份间丰水年小麦总耗水量较大、贫水年总耗水量较小。

(3) 保水剂应用对小麦产量提高具有积极效果,并表现为:V>T>F>CK。与CK相比,保水剂用量处理增产幅度分别达到2.31%~19.20%。但不同保水剂处理随着施用年限的延长,其增产趋势有着明显的不同,F处理至第4 a后对小麦的增产幅度趋于稳定,T处理的增产率随施用年限的增加逐步提升,V处理则表现为先增再减增,再减再逐步提高的过程。并显著地提高了单位净收益,与产量趋势一致,即V>T>F>CK。与CK相比,F平均增加767.39元/hm²,T处理平均增加1 077.60元,V处理平均增加1 413.09元/hm²。

(4) 施用保水剂可以显著提高小麦水分利用效率,其趋势与产量变化一致,即V>T>F>CK。不同年份间表现为先降低再升高,再降低再升高的过程。与土壤耗水量变化趋势一致,与贫水年降水量、总耗水量的变化趋势相反。与CK相比,V处理提高幅度最大,分别提高1.70~4.51 kg/(hm²·mm)。说明保水剂可显著提高小麦水分利用效率,这与武继承等^[7,22,25]、黄凤球等^[9]、黄占斌等^[10]、杨永辉等^[21,25,27]、雷巧等^[26]、李中阳等^[28]的结果基本一致,但保水剂用量和年限有明显差异^[9,10,26,28]。同时,小麦产量、水分利用效率、土壤耗水量、总耗水量之间呈

显著的正相关关系。因此,基于不同降水年型、小麦产量、水分利用效率、净收益等综合考虑,小麦最佳的保水剂用量为45 kg/hm²。

[参 考 文 献]

- [1] 杨连利,李仲瑾,邓娟利.保水剂的研究进展及发展新动向[J].材料导报,2005,19(6):42-44.
- [2] 李秧秧,黄占斌.节水农业中化控技术的应用研究[J].节水灌溉,2001(3):4-6.
- [3] Sojka R E, Bjorneberg D L, Entry J A, et al. Polyacrylamide in agriculture and environmental land management [J]. Advances in Agronomy, 2007,92:75-162.
- [4] 杨永辉,武继承,吴普特,等.秸秆覆盖与保水剂对土壤结构、蒸发及入渗过程的作用机制[J].中国水土保持科学,2009,7(5):70-75.
- [5] 董英,郭绍辉,詹亚力.聚丙烯酰胺的土壤改良效应[J].高分子通报,2004(5):83-87.
- [6] 牛育华,李仲瑾,郝明德.保水剂在黄土高原旱地农业应用效果研究[J].水土保持研究,2007,14(3):11-12.
- [7] 武继承,王志和,何方,等.不同技术措施对降水利用和土壤养分的影响[J].华北农学报,2005,20(6):73-76.
- [8] 武继承,杨稚娟,何方,等.试论河南省旱地节水农业发展的有效途径[J].河南农业科学,2006(1):5-8.
- [9] 黄凤球,杨立光,黄承武,等.化学节水技术在农业上的应用效果研究[J].水土保持研究,1996,3(3):118-124.
- [10] 黄占斌,万惠娥,邓西平,等.保水剂在改良土壤和作物抗旱节水中的效应[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(4):52-55.
- [11] 管秀娟,武继承.不同土壤水分条件下保水剂对小麦幼苗生理特性的影响[J].河南农业科学,2010(8):28-32.
- [12] 杨永辉,武继承,吴普特,等.保水剂用量对小麦不同生育期根系生理特性的影响[J].应用生态学报,2011,22(1):73-78.
- [13] 周岩,武继承,张彤,等.2种保水剂对砂土土壤持水性能的影响[J].河南农业科学,2012,41(2):78-81,92.
- [14] 杨永辉,李宗军,武继承,等.不同水分条件下保水剂对土壤持水与供水能力的影响[J].中国水土保持科学,2012,10(6):58-63.
- [15] 宋海燕,汪有科,汪星,等.保水剂用量对土壤水分的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(3):33-36.
- [16] 杨永辉,武继承,韩庆元,等.保水剂对土壤孔隙影响的定量分析[J].中国水土保持科学,2011,9(6):88-93.
- [17] 杨永辉,丁晋利,武继承,等.不同水分条件下保水剂对土壤结构的影响[J].土壤通报,2012,43(5):1065-1072.
- [18] 武继承,王志勇,史福刚.保水剂的发展现状及其在节水农业中的地位[J].云南大学学报,2006,21(5):47-50.

- [19] 任岩岩,武继承.保水剂对土壤性质及土壤微生物的影响研究进展[J].河南农业科学,2009(4):13-15.
- [20] 杨永辉,武继承,吴普特,等.保水剂对小麦生长及生理特性的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(3):133-137.
- [21] 杨永辉,武继承,何方,等.保水剂用量对冬小麦光合特性及水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(4):131-135.
- [22] 武继承,郑惠玲,史福刚,等.不同水分条件下保水剂对小麦产量和水分利用的影响[J].华北农学报,2007,22(5):40-42.
- [23] 武继承,杨永辉,郑惠玲,等.不同水分条件对小麦—玉米两熟制作物生长和水分利用的影响[J].华北农学报,2010,25(1):126-130.
- [24] 武继承,管秀娟,杨永辉.地面覆盖和保水剂对冬小麦生长和降水利用的影响[J].应用生态学报,2011,22(1):86-92.
- [25] 杨永辉,武继承,李宗军,等.保水剂对冬小麦生长及水分利用效率的影响[J].华北农学报,2011,26(3):173-178.
- [26] 雷巧,韩燕来,谭金芳,等.不同水分条件下保水剂对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J].中国土壤与肥料,2014(3):78-83.
- [27] 杨永辉,武继承,张洁梅,等.不同保墒耕作措施对小麦、玉米耗水特征及周年水分利用的影响[J].华北农学报,2017,32(3):103-110.
- [28] 李中阳,吕谋超,樊向阳,等.不同类型保水剂对冬小麦水分利用效率和根系形态的影响[J].应用生态学报,2015,26(12):3753-3758.
- [29] 马燕会,尹宝重,郭丽果,等.河北省麦田保水剂筛选及其节水效果评价[J].作物杂志,2015(2):111-117.
- [30] 张艳,马洪义.不同剂量保水剂对小麦光合及产量的影响[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2008,25(4):265-267.

(上接第 82 页)

- [18] 徐兰,罗维,周宝同.基于土地利用变化的农牧交错带典型流域生态风险评价:以洋河为例[J].自然资源学报,2015,30(4):580-590.
- [19] 王权,李阳兵,刘亚香,等.基于地形梯度的岩溶槽谷区土地利用空间格局分析[J].生态学报,2019,39(21):7866-7880.
- [20] 赵浩舟,王卫红,武锋强,等.基于土地利用变化的江油市生境质量时空变化分析[J].西南科技大学学报,2018,33(1):49-54.
- [21] 罗娜,张廷斌,易桂花,等.四川省江油市 2004—2020 年土地利用动态分析及预测[J].测绘与空间地理信息,2017,40(1):70-74.
- [22] 陈斌,王宏志,李仁东.鄂西南山地土地利用时空格局的梯度效应研究[J].湖北大学学报(自然科学版),2019,41(2):109-117.
- [23] 周志光,石晨,史林松,等.地理空间数据可视分析综述[J].计算机辅助设计与图形学学报,2018,30(5):747-763.
- [24] 刘世梁,安南南,尹艺洁,等.广西滨海区域景观格局分析及土地利用变化预测[J].生态学报,2017,37(18):5915-5923.