

旱地全膜覆土穴播春小麦的耗水特征及其对产量的影响

侯慧芝^{1,2}, 高世铭^{1,3}, 张绪成^{1,2}, 王德贵¹

(1. 甘肃农业大学农学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院旱地农业研究所,
甘肃省旱作区水资源高效利用重点实验室, 兰州 730070; 3. 甘肃省科学院, 兰州 730000)

摘要: 2012—2014年在西北黄土高原半干旱区甘肃定西(104°36' E, 35°35' N)进行大田定位试验, 以陇春27号小麦为试材, 设全膜覆土穴播充分灌溉(FMSI)、全膜覆土穴播(FMS)、露地穴播(CK)3个处理, 测定小麦不同生育时期的土壤含水量、生物量、产量、产量构成因子, 计算不同生育阶段耗水量、耗水模系数、耗水强度、水分利用效率等指标, 揭示全膜覆土穴播春小麦的耗水特征及其对产量和水分利用的影响。结果表明, 2013年和2014年FMSI播种—拔节、拔节—抽穗、抽穗—灌浆、灌浆—成熟4个生育阶段耗水量平均为159.5, 115.0, 47.7, 117.7 mm, 耗水模系数平均为39.7%, 21.5%, 13.8%, 25.0%, 年际间差异不显著, 可表征半干旱区全膜覆土穴播春小麦的需水规律。FMS处理0—300 cm土层的土壤贮水量在播种期、拔节期、灌浆期均高于CK。在播种—拔节期, FMS在2013年和2014年的耗水强度较CK分别增加了20.0%和5.8%, 但灌浆期降低了26.4%和14.1%。2012—2014年FMS的地上生物量在全生育期均显著高于CK, 其中成熟期分别增加了95.7%, 42.8%和108.7%。FMS的株高、穗长、单株重、穗重、小穗数、穗粒数和千粒重均显著高于CK, 使得在耗水量无显著增加的条件下, 产量增加了35.4%, 58.9%, 61.9%; WUE提高了44.6%, 54.6%, 69.0%。因此, 全膜覆土穴播可调节不同降水年型的春小麦耗水进程, 使得营养生长期的耗水模系数和耗水强度增加, 促进了作物源的建成, 在灌浆期耗水量降低的条件下提高产量和WUE。

关键词: 旱地; 全膜覆土穴播; 春小麦; 耗水特征; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S311; S318

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0202-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.01.034

Effects of Soil-plastic Mulching on Water Consumption Characteristics and Grain Yield of Spring Wheat in Semiarid Region

HOU Huizhi^{1,2}, GAO Shiming^{1,3}, ZHANG Xucheng^{1,2}, WANG Degui¹

(1. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070;

2. Institute of Dry-land Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Northwest Drought-resistant Crop Farming, Lanzhou 730070; 3. Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract: The spring wheat (*Triticum aestivum* longchun 27) selected as test material, a field experiment, which involved in three treatments were: (1) Whole field soil plastic mulching and irrigation (FMSI), (2) Whole field soil plastic mulching (FMS), and 3) Uncovered and bunch seeded (CK), had been conducted from 2012 to 2014 at Gansu Dingxi on northwest Loess Plateau (104°36' E, 35°35' N). The seasonal soil water content, biomass, yield and its components of spring wheat had been recorded, and the periodical water consumption, water consumption modulus coefficient, water consumption intensity, water use efficiency had been calculated, to reveal the water consumption characteristics of the whole field soil plastic mulching and bunch seeded spring wheat, and its effect on yield formation and water utilization. The average water consumption from sowing to jointing, jointing to heading, heading to filling, and filling to maturity of MSI in 2013 and 2014 were 159.5, 115.0, 47.7, 117.7 mm, the water consumption modulus coefficient were 39.7%, 21.5%, 13.8% and 25.0%, respectively, and there were no significant difference between 2013 and 2014. It's indicated that the results could be served as the spring wheat water requirement pattern under whole field soil plastic mulching condition. The soil water storage in 0—300 cm soil profile of FMS was higher

收稿日期: 2016-08-01

资助项目: 国家自然科学基金项目(31560355); 国家科技支撑计划项目(2015BAD22B04)

第一作者: 侯慧芝(1980—), 女, 在读博士研究生, 助理研究员, 主要从事农业生态研究。E-mail: houhuizhi666@163.com

通信作者: 高世铭(1962—), 男, 博士, 研究员, 主要从事农业生态研究。E-mail: gao-shm@sohu.com

张绪成(1973—), 男, 博士, 研究员, 主要从事旱地农业及植物生理研究。E-mail: gszhangxuch@163.com

than CK in sowing, jointing and filling of spring wheat. From sowing to jointing, the water consumption intensity of FMS increased by 20.0%, 5.8%, but from filling to maturity, it decreased by 26.4%, 14.1% in 2013 and 2014 respectively, as compared with CK. The biomass of FMS was significantly higher than CK from 2012 to 2014. Especially, it increased by 95.7%, 42.8% and 108.7% than CK in maturity. The plant height, spike length, plant weight, spike weight, spike lets numbers, spike grain number, 1000-grain weight of FMS were significantly higher than CK, resulted in the increment of grain yield for 35.4%, 58.9% and 61.9%, and increment of water use efficiency for 44.6%, 54.6% and 69.0% while without significantly increment of evapotranspiration from 2012 to 2014. Consequently, the FMS regulated the water consumption process in different precipitation year, improved the water consumption modulus coefficient and water consumption intensity in productive growth stage of spring wheat, this benefited to source development and resulted in increasing yield and WUE while decreasing evapotranspiration in filling.

Keywords: rain-fed region; whole field soil plastic mulching; spring wheat; water consumption characteristics; yield; water use efficiency

受自然降水和小麦需水规律不吻合、春季低温、伏旱高温等因素的影响,西北黄土高原半干旱区小麦产量长期低而不稳^[1]。已有研究证明,地膜覆盖后作物生长前期水分条件得以改善,作物营养生长加快,促进对土壤水分的消耗,造成生殖生长阶段的土壤干旱,导致经济产量下降^[2-4]。因此,调配作物耗水过程,使较多的土壤水分供作物生殖生长所需,成为地膜覆盖条件下进一步提高作物产量和水分利用效率的重点研究内容^[5-6]。

作物的耗水过程受养分、覆盖、灌溉制度等因素的影响显著,而且耗水过程的改变必然导致作物产量和水分利用效率的变化^[7-15]。许翠平等^[13]研究表明,秸秆覆盖能有效降低冬小麦生育期内总耗水量,使冬小麦的耗水量在冬前至拔节期最高。地膜覆盖降低了冬小麦播种—返青、抽穗—成熟的耗水量,提高了拔节—抽穗的耗水量^[15]。樊向阳等^[16]研究表明,地膜覆盖可增加玉米抽穗以后的耗水强度,降低拔节—抽穗期的耗水强度。耕作措施对作物耗水特性的改变,主要与其影响农田蒸发有关,进而影响作物的耗水过程^[17]。全膜覆土穴播栽培技术不仅因集雨抑蒸改善作物生育前期的土壤水分状况,而且可提高小麦前期土壤温度,有效降低灌浆期土壤温度,从而避免高温导致青干造成的小麦减产^[17-21]。多年研究表明,全膜覆土穴播栽培技术可使小麦增产30%以上,且可显著提高水分利用效率^[18-19]。地膜覆盖后土壤水分和热量条件的阶段性得以改变,必然影响作物生长发育进程,进而影响作物的需耗水特性。目前已经探明了全膜覆土穴播小麦栽培技术的增产效应^[18-22],并在土壤水热条件改善^[18-21]、生长发育动态等方面有较深入探讨,但对全膜覆土穴播条件下春小麦的需水规律缺乏认识,而且对其耗水特性研究较少,研究这一问题,将对探讨进一步提高全膜覆盖条件下小麦产量和水分利用效率的技术

途径有重要意义。本试验通过测定全膜覆盖条件下足量灌水处理在不同生育时期的耗水量来确定春小麦需水规律,比对分析全膜覆土穴播和露地穴播春小麦不同生育期的阶段耗水量、耗水模系数、耗水强度等,明确全膜覆土穴播春小麦的需水规律,揭示全膜覆土穴播春小麦的耗水特征及其对产量形成和水分利用的影响,为调控地膜春小麦耗水过程提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2012—2014年在甘肃省农业科学院定西试验站(104°36' E, 35°35' N)进行。该区海拔1 970 m,年平均气温6.2℃,年辐射总量5 898 MJ/m²,年日照时数2 500 h,≥10℃积温2 075.1℃,无霜期140 d,属中温带半干旱气候。作物一年一熟,为典型旱地雨养农业区。平均年降水量为415 mm,6—9月降水量占年降水量的68%,降水相对变率为24%,400 mm降水保证率为48%。土壤为黄绵土,0—30 cm土层平均容重1.25 g/cm³,田间持水量为21.18%,永久凋萎系数为7.2%。

根据甘肃省农业科学院定西试验站气象资料统计,2012年试验区全年降雨484.4 mm,春小麦生育期降雨219.3 mm,主要集中在5—7月。2013年试验区全年降雨551.9 mm,春小麦生育期降雨308.6 mm,但从2月19日—4月18日无降雨,7月份降雨几乎占整个生育期降雨的一半。2014年试验区全年降雨量为482.2 mm,小麦生育期降雨量为205.7 mm,其中4月份降雨76.3 mm,5月份降雨17.2 mm,6月份降雨81.9 mm,降雨季节分配严重不均,季节性干旱特征非常明显,与春小麦生育期需水规律不吻合。2012年试验区最低温为-19.8℃,最高温为21.6℃,平均气温为6.33℃;2013年最低温为-13.6℃,最高温为21.4℃,平均气温为7.19℃;2014年最低温为-11.9℃,最高温为23.6℃,

平均气温为 6.82 ℃。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 试验以甘肃省农业科学院小麦研究所选育的春小麦陇春 27 号为试验材料,设全膜覆土穴播(FMS,地膜平铺整个地面,在膜上覆土 1—2 cm)、全膜覆土穴播充分灌溉(FMSI,当 0—100 cm 土层土壤含水量小于田间持水量 85%时补充灌溉)和露地穴播(CK)3 个处理,每个处理 3 次重复,小区面积 52.5 m² (7 m×7.5 m),采用完全随机设计。2012 年 FMSI 和 FMS 2 个处理均在播种前整地施肥覆膜,在 2012 年和 2013 年小麦收获后整地施肥覆膜,次年春季播种。3 个处理均用穴播机播种,每穴

播(10±2)粒,行距为 20 cm,穴距为 13 cm;各处理施肥量均为:N 150 kg/hm²,P₂O₅ 180 kg/hm²,K₂O 84 kg/hm²,肥料采用基施。本试验 3 年播种和收获期分别为:2012 年 3 月 16 日播种,7 月 23 日收获;2013 年 3 月 20 日播种,7 月 30 日收获;2014 年 3 月 23 日播种,7 月 30 日收获。FMSI 处理根据土壤水分情况进行补充灌溉,不同生育期的灌溉量见表 1;FMS 和 CK 不灌溉。整个试验除人工拔草外不进行其他管理。灌溉量的计算:根据当季生育期土壤水分测定结果进行补充灌溉。小区净灌溉量/mm=[85%×田间持水量(21.18%)—土壤含水量(0—1 m 土层)]×土壤容重×小区面积。

表 1 全膜覆土穴播足量灌溉处理灌水时期及净灌水量

年份(年)	1 m 土层平均含水量/%				灌溉量/mm				合 计
	苗期	拔节期	抽穗期	灌浆期	苗期	拔节期	抽穗期	灌浆期	
2012	13.7	14.1	15.8	15.1	47.6	43.1	24.5	32.7	147.9
2013	16.3	18.3	13.6	18.4	19.1	0.0	49.0	0.0	68.1
2014	14.1	16.3	13.2	15.6	43.9	19.1	53.4	26.7	142.9

1.2.2 测定指标及方法

(1)土壤贮水量。在小麦播前、苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期每 20 cm 分别用土钻法取各小区 0—300 cm 土样,用烘干称重法测定土壤含水量,并计算土壤贮水量,计算公式如下:SWS=W_s·b·d/10。式中:SWS 为土壤贮水量(mm);W_s 为土壤含水量(g/kg);b 为土壤容重(g/cm³);d 为土壤深度(cm);10 为单位转换系数。

(2)生物量。在小麦苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期,分别取长势均一的 10 株小麦,用烘干法测定地上生物重。

(3)产量及其构成因素。成熟期每小区随机取 20 株进行室内考种,考种指标包括穗长、穗重、穗粒数、穗粒重、单株生物量;每个小区单打单收,统计实际产量,折合成公顷产量。

(4)阶段耗水量(ET_i)。ET_i(mm)=SWS_i—SWS_{i+1}+P_i+I。式中:SWS_i为某个生育时期初始时的土壤贮水量(mm);SWS_{i+1}为该生育时期结束时的土壤贮水量(mm);P_i为该生育期降雨量(mm);I 为净灌水量(mm)。

(5)耗水模系数和耗水强度。参考马尚宇等^[8]的方法,耗水模系数=ET_i/ET,耗水速率 CWR(mm/d)=ET_i/d。式中:ET_i为各生育阶段麦田耗水量(mm);ET 为麦田总耗水量(mm);d 为生育阶段天数(d)。

(6)水分利用效率。参考王红丽等^[5]的方法,水分利用效率 WUE=Y/ET。式中:Y 为小麦单位面积产量(kg/hm²);ET 为小麦生育期耗水量(mm)。

1.2.3 数据处理与分析 用 Excel 2003 和 DPS 统

计分析软件处理数据,Tukey 法检验处理间的差异显著性。

2 结果与分析

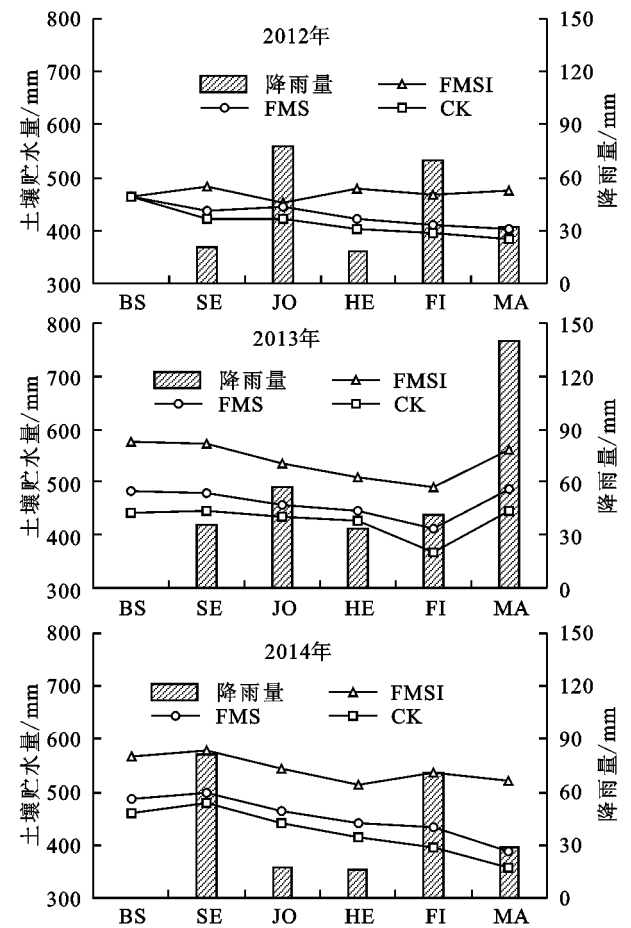
2.1 覆盖与灌溉对 0—300 cm 土层土壤贮水量的影响

由图 1 可知,随生育期的推进,各处理 0—300 cm 土层的土壤贮水量呈下降趋势,在平水年(2012 年和 2014 年)下降趋势尤为明显;丰水年(2013 年)在灌浆期—成熟期土壤贮水量有升高,并在收获后达到和播种期相近水平。全膜覆土穴播充分灌水处理(FMSI)显著增加土壤贮水量,除 2012 年拔节期外,其余生育期在 3 年均显著高于全膜覆土穴播(FMS)和对照(CK),其中 FMSI 土壤贮水量较 FMS 在 2012—2014 年的拔节期分别增加了 10.3,80.0,79.8 mm,灌浆期分别增加了 57.6,78.7,103.4 mm。FMS 处理的土壤贮水量高于 CK,2012—2014 年苗期分别增加了 15.6,34.1,18.0 mm;拔节期分别增加了 21.9,22.1,20.7 mm,灌浆期分别增加了 15.1,42.1,37.4 mm,并在 2013 年和 2014 年播前增加了 42.1,27.4 mm。

由图 2 可知,春小麦田 0—300 cm 土壤贮水量的垂直变化受覆盖、春小麦生育进程、降水分布和灌溉的显著影响。随春小麦生长,土壤深层贮水量呈下降趋势,降雨和补灌后得到补充。2012 年播前和拔节期不同层次的土壤贮水量在处理间无显著差异,但在抽穗期和灌浆期 FMSI 在 40—240 cm 土层的土壤贮水量显著高于 FMS 和 CK,FMS 和 CK 之间无显著差异。与拔节期相比,各处理抽穗期 0—120 cm 土层的土壤贮水量显著下降,但 120—260 cm 土层的土壤贮水量显著增加;灌浆期降水 70 mm,0—120 cm 土

层土壤贮水量较抽穗期显著增加,而 120—220 cm 土层的土壤贮水量显著下降。

2013 年属于丰水年,但与播种前相比,3 个处理 0—120 cm 土层的土壤贮水量均呈下降趋势,FMSI、FMS 和 CK 在拔节期、抽穗期和灌浆期分别下降了 26.9、26.2、4.6 mm;74.0、71.2、48.8 mm;51.6、59.5、64.6 mm。FMSI 播前各层次的土壤贮水量高于 FMS 和 CK,尤其在 60—300 cm 土层达到显著差异;FMS 在各土层的土壤贮水量高于 CK,播前和拔节期在 120—200 cm 土层,灌浆期在 40—80 cm 土层均达显著差异。



注:BS为播前;SE为苗期;JO为拔节期;HE为抽穗期;FI为灌浆期;MA为成熟期。下同。

图 1 覆盖和灌溉条件下 0—300 cm 土层土壤贮水量随生育期的变化

2014 年属平水年,随生育进程的推进,0—120 cm 土层的土壤贮水量呈明显下降趋势,FMSI、FMS 和 CK 在拔节期、抽穗期和灌浆期分别下降 20.1、2.1、14.5 mm;49.5、35.6、42.8 mm;46.6、49.6、52.8 mm;但 120 cm 土层以下的土壤贮水量变化幅度相对较小,对应的 3 个时期分别下降了 4.8、21.0、1.9 mm;3.7、10.2、0.1 mm;—16.3、2.5、9.4 mm。FMS 在各层次的土壤贮水量高于 CK,在拔节期和灌浆期 120—220 cm 土层达到显著差异($P<0.05$)。

2012 年 FMSI 在 20—120 cm 各土层的土壤贮

水量高于 30 mm,其重量含水量在 14% 以上,但 140—300 cm 各土层的土壤贮水量低于 30 mm;而在 2013 年和 2014 年各生育期 40—300 cm 的各土层土壤贮水量高于 30 mm,平均土壤重量含水量高于 16%,即在田间持水量的 75% 以上。因此,2013 年和 2014 年 FMSI 处理的土壤水分条件基本能够满足春小麦生长所需,可将这 2 年的 FMSI 处理作为无水分限制的研究对象,其耗水规律可作为全膜覆土穴播春小麦的需水规律。

2.2 覆盖和灌溉对春小麦阶段耗水量、耗水模系数和耗水强度的影响

由表 2 可知,覆盖和灌溉对春小麦田 0—300 cm 土壤阶段性耗水有显著影响。2012 年,FMS 和 CK 的阶段耗水量以播种—拔节最高,抽穗—灌浆次之,拔节—抽穗、灌浆—成熟无显著差别。2013 年 FMS 以播种—拔节的耗水量最高,抽穗—灌浆最低,拔节—抽穗和灌浆—成熟接近;而 CK 耗水量以灌浆—成熟最高,播种—拔节次之,抽穗—灌浆最低。2014 年 FMS 和 CK 的耗水量均以播种—拔节最高,灌浆—成熟次之,抽穗—灌浆最低。覆盖使春小麦不同生育期耗水量发生较为显著的变化,2012 年 FMS 播种—拔节耗水量显著低于 CK,但在其余生育期与 CK 无显著差异;2013 年为丰水年,播种—拔节和拔节—抽穗的 FMS 耗水量较 CK 增加了 20.0 mm 和 12.0 mm,抽穗—灌浆 2 个处理间无显著差异,但灌浆—成熟降低了 26.4 mm,均达到显著差异水平($P<0.05$);2014 年 FMS 和 CK 在各生育期耗水量无显著差异。2012 年,2013 年和 2014 年 FMSI 的耗水量在播种—拔节分别比 FMS 和 CK 增加了 37.4、32.3、45.6 mm 和 15.4、52.3、52.2 mm,在灌浆—成熟分别比 FMS 和 CK 增加了 18.9、46.6、37.3 mm 和 14.9、20.1、24.6 mm,均达到显著差异水平($P<0.05$)。拔节—抽穗,FMSI 的耗水量除 2012 年与 FMS 和 CK 基本一致外,2013 年和 2014 年分别比 FMS 和 CK 增加了 43.4、55.1 mm 和 55.3、52.4 mm,且差异达显著水平。抽穗—灌浆,FMSI 的耗水量在 2012 年,2013 年和 2014 年比 FMS 和 CK 分别高 18.3、3.8、7.5 mm 和 22.2、6.5、3.8 mm。基于 FMSI 处理土壤贮水量的季节和垂直分布结果,可将 2013 年和 2014 年 FMSI 的阶段土壤耗水量作为全膜覆土穴播春小麦的需水规律。2013—2014 年 FMSI 在播种—拔节、拔节—抽穗、抽穗—灌浆、灌浆—成熟 4 个生育时期阶段耗水量平均为 159.5、115.0、47.7、117.7 mm,两年平均总耗水量为 439.9 mm,且阶段耗水量年际间无显著性差异。因此,本研究结果可作为西北黄土高原半干旱区全膜覆土穴播春小麦的需水规律。

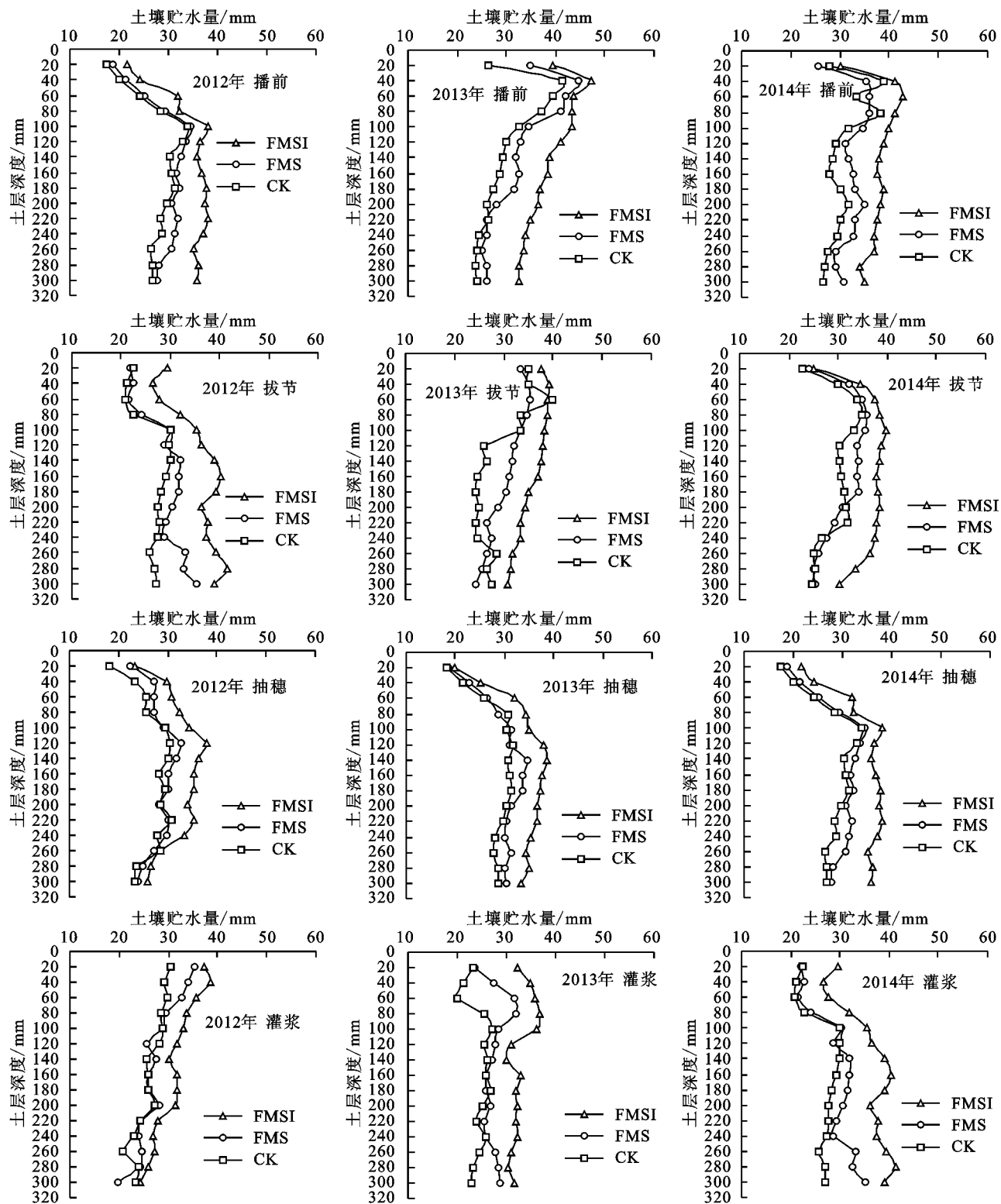


图 2 覆盖和灌溉条件下春小麦田 0—300 cm 土壤贮水量随生育期的垂直变化

春小麦的耗水模系数受覆盖、灌溉和降水年型的影响(表 2)。2012 年, FMSI 的耗水模系数在播种—拔节期间最高, 抽穗—灌浆次之, 拔节—抽穗最低; FMS 和 CK 均以播种—拔节最高, 抽穗—灌浆次之, 拔节—抽穗和灌浆—成熟相近。2013 年 FMSI 和 FMS 的耗水模系数均以播种—拔节最高, 拔节—抽穗和灌浆—成熟基本一致, 抽穗—灌浆最低; CK 的耗水模系数以播种—拔节和灌浆—成熟基本一致, 为最高, 拔节—抽

穗次之, 抽穗—灌浆最低。2014 年各处理的耗水模系数均以播种—拔节最高, 灌浆—成熟次之, 抽穗—灌浆最低。FMSI 在 2013 年和 2014 年的耗水模系数在播种—拔节、拔节—抽穗、抽穗—灌浆、灌浆—成熟 4 个生育阶段平均为 36.3%, 26.1%, 10.8% 和 26.8%, 年际间变化较小。FMS 耗水模系数在 2012 年播种—拔节较 CK 下降了 9.8%, 但在 2013 年和 2014 年增加了 16.9% 和 10.4%; 2012 年和 2013 年

在拔节—抽穗 FMS 的耗水模系数显著高于 CK($P<0.05$),分别增加了 15.2%和 14.8%,2014 年无显著差异;2012 年在抽穗—灌浆 FMS 的耗水模系数显著高于 CK($P<0.05$),但 2013 年和 2014 年处理间无显著差异;灌浆—成熟 FMS 的耗水模系数低于 CK,2012—2014 年分别降低了 3.2%,28.3%和 10.3%,其中,2013 年和 2014 年达到显著差异($P<0.05$)。

FMSI 的耗水强度在 3 年的各生育期均高于 FMS 和 CK(表 2)。FMSI 的耗水强度在播种—拔节、拔节—抽穗、抽穗—灌浆和灌浆—成熟分别比 FMS 和 CK 高 0.9~1.1,0.4~1.4 mm/d(播种—拔节)、0.1~2.2,0.2~2.1 mm/d(拔节—抽穗)、0.2~0.9,0.2~1.1 mm/d(抽穗—灌浆)、0.5~1.1,0.4~0.6 mm/d(灌浆—成熟)。2012 年 FMSI 的耗水强度以抽穗—灌

浆最高,播种—拔节次之,拔节—抽穗和灌浆—成熟相近,2013 年和 2014 年按生育进程依次为 4.1,4.5,1.5,3.0mm/d 和 4.0,4.3,1.9,2.9 mm/d。

2012 年 FMS 和 CK 的耗水强度的变化趋势和 FMSI 相似。2013 年和 2014 年 FMS 的耗水强度以播种—拔节最高,拔节—抽穗次之,2013 年在灌浆—成熟最低,2014 年抽穗—灌浆最低。CK 在 2013 年和 2014 年耗水强度以播种—拔节最高,拔节—抽穗和灌浆—成熟次之,抽穗—灌浆最低。2012 年 FMS 的耗水强度在播种—拔节显著低于 CK($P<0.05$),但在其余生育期无显著差异;2013 年 FMS 的耗水强度在播种—拔节和拔节—抽穗显著高于 CK,但在灌浆—成熟期显著低于 CK($P<0.05$),抽穗—灌浆二者无显著差异;2014 年 FMS 的耗水强度和 CK 无显著差异。

表 2 覆盖和灌溉对春小麦阶段耗水量、耗水模系数和耗水强度的影响

年份 (年)	生育阶段	阶段耗水量/mm			耗水模系数/%			耗水强度/(mm·d ⁻¹)		
		FMSI	FMS	CK	FMSI	FMS	CK	FMSI	FMS	CK
2012	播种—拔节	157.1 a	119.7 c	141.7 b	43.9 b	42.6 b	47.2 a	4.4 a	3.3 c	3.9 b
	拔节—抽穗	42.7 a	40.7 a	37.7 a	16.3 a	14.5 b	12.6 c	1.4 a	1.4 a	1.3 a
	抽穗—灌浆	100.3 a	82.0 b	78.1 b	33.1 a	29.2 b	26.0 c	5.0 a	4.1 b	3.9 b
	灌浆—成熟	57.8 a	38.9 b	42.9 b	20.7 a	13.8 b	14.3 b	1.4 a	0.9 b	1.0 b
2013	播种—拔节	152.1 a	119.8 b	99.8 c	34.2 b	37.7 a	32.2 b	4.1 a	3.2 b	2.7 c
	拔节—抽穗	122.0 a	78.6 b	66.7 c	27.5 a	24.7 a	21.5 b	4.5 a	2.9 b	2.5 c
	抽穗—灌浆	49.3 a	45.5 b	42.8 b	11.1 b	14.3 a	13.8 a	2.1 b	1.9 a	1.8 a
	灌浆—成熟	120.6 a	74.0 c	100.5 b	27.2 b	23.3 c	32.4 a	2.7 a	1.7 c	2.3 b
2014	播种—拔节	166.9 a	121.3 b	114.7 b	38.3 b	41.8 a	37.9 b	4.0 a	2.9 b	2.7 b
	拔节—抽穗	108.0 a	52.9 b	55.6 b	24.8 a	18.2 b	18.4 b	4.3 a	2.1 b	2.2 b
	抽穗—灌浆	46.0 a	38.5 b	42.2 b	10.6 a	13.3 a	13.9 a	1.9 a	1.6 b	1.8 ab
	灌浆—成熟	114.9 a	77.6 b	90.3 b	26.4 b	26.7 b	29.8 a	2.9 a	1.9 b	2.3 b

注:同一行同一指标不同字母表示不同处理差异显著($P<0.05$)。下同。

2.3 覆盖和灌溉对春小麦地上生物量的影响

覆盖和补灌能够显著提高春小麦地上生物量(图 3)。3 年试验期间以 FMSI 的地上生物量最高,除 2013 年成熟期与 FMS 无显著差异外,其余时期均与 FMS 和 CK 达到显著差异($P<0.05$)。FMS 的地上生物量显著高于 CK($P<0.05$),成熟期在 2012 年,2013 年和 2014 年分别增加了 95.7%,42.8%和 108.7%。

2.4 覆盖和灌溉对春小麦产量构成因子的影响

覆盖和补灌对春小麦产量构成因子有显著影响(表 3)。与 CK 相比,FMSI 和 FMS 的株高显著增加,但 FMSI 和 FMS 之间无显著差异;FMSI 和 FMS 的穗长显著高于 CK,而且 FMSI 在 2012 年和 2013 年显著高于 FMS;FMSI 的单株重和穗重最高,FMS 次之,CK 最低,处理间达到显著差异($P<0.05$);FMSI 和 FMS 的小穗数显著高于 CK($P<0.05$),但在 2013 年和 2014 年 FMSI 和 FMS 无显著差异;FMSI 和 FMS 的穗粒数显著高于 CK($P<0.05$),2012 年和 2013 年 FMSI 显著高于 FMS($P<0.05$),

2014 年无显著差异;FMSI 和 FMS 的千粒重无差异,但均显著高于 CK($P<0.05$)。与 CK 相比,FMSI 处理 3 年试验期间的株高增加 15.8%~39%,穗长增加 24.2%~5.3%,单株重增加 53.1%~141.6%,穗重增加 57.0%~150.0%,小穗数增加 26.1%~55.8%;穗粒数增加 36.9%~102.9%,千粒重增加 10.8%~18.9%。

2.5 覆盖和灌溉对春小麦耗水量、产量、水分利用效率和收获指数的影响

FMSI 产量最高,FMS 次之,CK 最低,处理间差异显著($P<0.05$),FMSI 较 FMS 在 2012 年,2013 年和 2014 年分别增产 17.8%,29.5%和 15.2%,FMS 较 CK 分别增产 35.4%,58.9%和 61.9%(表 4)。FMSI 的耗水量显著高于 FMS 和 CK($P<0.05$),但 FMS 和 CK 之间无显著差异。2012 年,2013 年和 2014 年 FMSI 的耗水量较 FMS 增加了 76.6,126.0,145.6 mm。FMS 的 WUE 最高,在 2012 年,2013 年和 2014 年较 FMSI 分别提高了 30.3%,16.1%和 30.0%,并在

2012 年和 2014 年达到显著差异 ($P<0.05$), 较 CK 提高了 44.6%, 54.6% 和 69.0%, 均达到显著差异 ($P<0.05$)。FMSI 的 WUE 在 2012 年, 2013 年和 2014 年均显著高于 CK, 分别提高了 11.8%, 33.3% 和 29.6%。3 个处理收获指数以 FMS 最高, CK 次之, FMSI 最低, 但处理间均无显著差异。

表 3 覆盖和补灌对春小麦产量构成因子的影响

年份(年)	处理	株高/cm	穗长/cm	单株重/g	穗重/g	小穗数(个)	穗粒数(个)	千粒重/g
2012	FMSI	97.6 a	10.6 a	4.7 a	2.9 a	17.4 a	49.2 a	42.9 a
	FMS	94.9 a	9.6 b	3.8 b	2.3 b	15.5 b	41.3 b	40.4 a
	CK	76.6 b	7.7 c	2.2 c	1.3 c	11.4 c	27.5 c	36.1 b
2013	FMSI	86.4 a	9.4 a	3.7 a	2.4 a	15.1 a	41.7 a	42.2 a
	FMS	80.7 a	8.9 b	3.5 b	2.0 b	14.9 a	36.8 b	41.3 a
	CK	74.6 b	7.6 c	2.4 c	1.5 c	12.0 b	30.4 c	38.1 b
2014	FMSI	83.4 a	9.4 a	3.9 a	2.5 a	18.3 a	41.7 a	43.1 a
	FMS	78.1 a	9.2 a	3.4 b	2.3 b	17.0 a	38.3 a	42.6 a
	CK	60.0 b	6.5 b	1.6 c	1.0 c	11.7 b	20.6 b	37.4 b

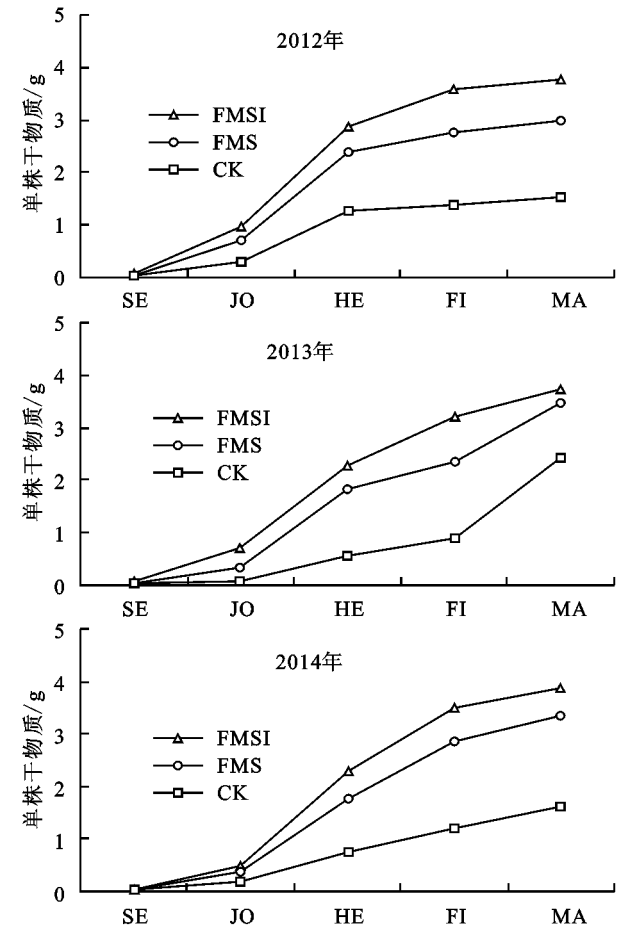


图 3 覆盖和灌溉对春小麦地上干物质积累的影响

表 4 覆盖和灌溉对春小麦产量、耗水量和水分利用效率的影响

年份 (年)	处理	耗水量/ mm	产量/ (kg · hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)	收获 指数
2012	FMSI	357.9 a	3270.2 a	9.1 a	0.4 a
	FMS	281.3 b	2775.7 b	9.9 a	0.5 a
	CK	300.3 b	2049.6 c	6.8 b	0.4 a
2013	FMSI	444.0 a	2878.6 a	6.5 a	0.4 a
	FMS	318.0 b	2223.0 b	7.0 a	0.5 a
	CK	309.7 b	1398.8 c	4.5 b	0.5 a
2014	FMSI	435.7 a	3025.7 a	6.9 b	0.5 a
	FMS	290.1 b	2627.1 b	9.1 a	0.5 a
	CK	302.8 b	1622.6 c	5.4 c	0.5 a

3 讨论

全膜覆土穴播栽培技术可明显改善春小麦生育前期的土壤水热条件, 促进小麦前期生长^[18-22], 这可能会对春小麦的阶段耗水量和耗水模系数产生影响。本试验结果表明, 全膜覆土穴播足量灌溉(FMSI)3 年的阶段耗水量均以播种—拔节最高, 灌浆—成熟次之, 抽穗—灌浆最低, 耗水模系数与阶段耗水量表现相同的变化趋势。但与 CK 相比, FMSI 改变了不同生育期的耗水强度, 以拔节—抽穗最高, 播种—拔节次之, 抽穗—灌浆最低; CK 则以播种—拔节最高, 拔节—抽穗次之, 抽穗—灌浆最低。虽然 CK 的耗水量和耗水模系数的变化趋势与 FMSI 相似, 均在播种—拔节和灌浆—成熟期较高, 但二者有实质性不同, CK 在这两个时期的土面蒸发增强^[5], 导致耗水量、耗水模系数甚至耗水强度的增加, 而 FMSI 耗散的水分主要用于作物蒸腾。本试验中, 2012 年 FMSI 在 20—120 cm 各土层的土壤贮水量高于 30 mm, 但 140—300 cm 各土层的土壤贮水量低于 30 mm, 低于田间持水量的 75%, 不能满足春小麦生长所需, 可能原因是试验控制不理想, 所以 2012 年 FMSI 各阶段的耗水量不具代表性, 不能用于衡量全膜覆土穴播春小麦的需水量。2013 和 2014 年 FMSI 处理的春小麦各生育期 40—300 cm 的各土层土壤贮水量在田间持水量的 75% 以上, 土壤水分条件基本能够满足春小麦生长所需。因此, 2013—2014 年 FMSI 处理在各生育阶段的耗水量可等同为阶段需水量, 即西北黄土高原全膜覆土穴播春小麦在播种—拔节、拔节—抽穗、抽穗—灌浆和灌浆—成熟期其需水量依次为 159.5, 115.0, 47.7, 117.7 mm, 全生育期总需水量为 439.9 mm。

地膜覆盖后降低了土面蒸发, 使得苗期耗水量下降而土壤贮水量升高^[2-4, 19-21], 但土面蒸发受降水多少和土壤温度的显著影响^[23-24]。本试验结果表明, 在降水较多的 2013 年, 全膜覆土穴播(FMS)在播种—拔节时期的耗水量较 CK 增加了 20.0 mm, 但在降水

较少的2012年则下降了12.0 mm,均达到显著差异水平;相应的耗水模系数分别提高了16.9%和下降了9.8%。但在生育前期FMS和CK所消耗水分的用途有本质不同,前者主要用于作物蒸腾,后者主要是土面蒸发^[25]。耗水强度同样受降水年型的显著影响,丰水年份FMS的耗水强度在播种—拔节、拔节—抽穗显著高于CK,而灌浆—成熟期显著低于CK;但在平水年份灌浆—成熟的耗水强度在2个处理间无显著差异。覆盖不仅对春小麦阶段耗水量、耗水模系数和耗水强度有显著影响,而且调节了春小麦的耗水过程。在丰水年,FMS阶段耗水量以播种—拔节最高,拔节—抽穗次之,抽穗—灌浆最低;但CK在灌浆—成熟、播种—拔节最高,抽穗—灌浆最低,这主要是由于在播种—拔节、灌浆—成熟期间CK的蒸发量增加^[25],加大了耗水量。在2012年和2013年,FMS和CK在不同生育阶段的耗水量变化关系相似,但在播种—拔节、灌浆—成熟期CK的耗水量较FMS有较为明显的增加趋势。表明通过耕作栽培等措施可调节作物的蒸腾蒸发关系,进而实现对作物耗水过程的调控^[6,8]。

地膜覆盖后作物生育前期的水分状况得到明显的改善,促进了作物生长发育^[2,19,22],所以FMS的株高显著高于CK。在拔节—抽穗、抽穗—灌浆期间FMSI的土壤贮水量显著高于FMS和CK,而且耗水量显著增加,所以FMSI的穗长和单株重相应增加;FMS的土壤贮水量在拔节—抽穗、抽穗—灌浆高于CK,虽然耗水量没有显著提高,但地膜覆盖处理耗散的水分主要用于作物蒸腾,而露地则土面蒸发较强,所以FMS的穗长和单株重显著高于CK。FMSI在抽穗—灌浆、灌浆—成熟期的耗水量显著高于FMS和CK,所以小穗数、穗粒数和千粒重高于FMS和CK;FMS的小穗数、穗粒数和千粒重均显著高于CK,但FMS在抽穗—灌浆、灌浆—成熟的耗水量不但无显著增加,而且在2013年的灌浆—成熟期显著低于CK,表明CK在这一生育阶段有较多土壤水分被蒸发。2012年和2013年FMSI的千粒重和FMS无显著差异,2013年FMSI和FMS的小穗数无显著差异,表明在上述生育时期FMSI存在冗余耗水,这不利于WUE的提高。因此,虽然FMS和CK的阶段耗水量、耗水模系数和耗水强度之间的变化关系因降水年型呈显著不同,但由于地膜覆盖降低了土面蒸发,改变了土壤耗水的蒸腾蒸发关系,进而影响春小麦的耗水过程和耗水特性,使更多水分用于作物生产,所以FMS的地上生物量、产量及其构成因子和水分利用效率显著高于CK。

4 结论

西北黄土高原半干旱区全膜覆土穴播春小麦全生育期总耗水量为439.9 mm,在播种—拔节、拔节—抽穗、抽穗—灌浆和灌浆—成熟期的需水量分别为159.5、115.0、47.7、117.7 mm。在丰水年份,FMS可提高春小麦生育前期的耗水量、耗水模系数和耗水强度,但使之在灌浆期下降;平水年份,FMS降低了播种—拔节期的耗水量、耗水强度和耗水模系数。虽然FMS和CK在播种—拔节、灌浆—成熟期的耗水量、耗水模系数和耗水强度的变化关系受降水年型的显著影响,但由于FMS消耗水分主要用于作物蒸腾,而CK则主要用于土面蒸发,所以FMS的地上生物量显著高于CK,且在耗水量无显著增加的情况下在2012年、2013年和2014年产量分别提高了35.4%、58.9%和61.9%,水分利用效率提高44.6%、54.6%和69.0%。FMSI在明显提高春小麦产量的同时,也增加冗余耗水,致使水分利用效率低于FMS,尤其是平水年达到显著差异。

参考文献:

- [1] 史晓霞. 黄土高原半干旱区主要作物生育期土壤水分变化[J]. 干旱气象, 2011, 29(4): 461-465.
- [2] 王同朝, 卫丽, 王燕, 等. 夏玉米垄作覆盖对农田土壤水分及其利用影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 129-132.
- [3] Xie Z K, Wang Y J, Li F M. Effect of plastic mulching on soil water use and spring wheat yield in arid region of northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2005, 75(1): 71-83.
- [4] Zhang S L, Li P R, Yang X Y. Effects of tillage and plastic mulch on soil water, growth and yield of spring-sown maize[J]. Soil & Tillage Research, 2011, 112(1): 92-97.
- [5] 王红丽, 张绪成, 宋尚有, 等. 西北黄土高原旱地全膜双垄沟播种植对玉米季节性耗水和产量的调节机制[J]. 中国农业科学, 2013, 46(5): 917-926.
- [6] 刘战东, 高阳, 巩文军. 模拟降雨条件下覆盖方式对冬小麦降水利用的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 153-158, 197.
- [7] 宋常吉, 王振华, 郑旭荣, 等. 北疆滴灌春小麦耗水特征及作物系数的确定[J]. 西北农业学报, 2013, 22(3): 58-63.
- [8] 马尚宇, 于振文, 张永丽, 等. 不同畦宽灌溉对小麦耗水特性和产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(8): 1531-1540.
- [9] Li J M, Inanaga S, Li Z H, et al. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2005, 76(1): 8-23.
- [10] 郑成岩, 于振文, 张永丽, 等. 不同施肥水平下灌水量对小麦水分利用特征和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2799-2805.

- [11] Jiang J, Huo Z L, Feng S Y, et al. Effect of irrigation amount and water salinity on water consumption and water productivity of spring wheat in Northwest China [J]. *Field Crops Research*, 2012, 137: 78-88.
- [12] 余坤, 冯浩, 李正鹏, 等. 秸秆还田对农田土壤水分与冬小麦耗水特征的影响 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45 (10): 116-123.
- [13] 许翠平, 刘洪禄, 车建明, 等. 秸秆覆盖对冬小麦耗水特征及水分生产率的影响 [J]. *灌溉排水*, 2002, 21(3): 24-27.
- [14] Huang Y L, Chen L D, Fu B J, et al. The wheat yields and water-use efficiency in the Loess Plateau: Straw mulch and irrigation effects [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 72(3): 209-222.
- [15] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦—夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响 [J]. *中国农业科学*, 2014, 47(17): 3359-3371.
- [16] 樊向阳, 齐学斌, 郎旭东, 等. 不同覆盖条件下春玉米田耗水特征及提高水分利用率研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(2): 60-64.
- [17] Jin K, Cornelis W M, Schiettecatte W, et al. Effects of different management practices on the soil-water balance and crop yield for improved dryland farming in the Chinese Loess Plateau [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1): 131-144.
- [18] 侯慧芝, 吕军峰, 郭天文, 等. 全膜覆土栽培对作物的水温效应 [J]. *麦类作物学报*, 2012, 32(6): 1111-1117.
- [19] 侯慧芝, 吕军峰, 郭天文, 等. 西北黄土高原半干旱区全膜覆土穴播对土壤水热环境和小麦产量的影响 [J]. *生态学报*, 2014, 34(19): 5503-5513.
- [20] 王红丽, 宋尚有, 张绪成, 等. 半干旱区旱地春小麦全膜覆土穴播对土壤水热效应及产量的影响 [J]. *生态学报*, 2013, 33(18): 5580-5588.
- [21] 侯慧芝, 吕军峰, 郭天文, 等. 旱地全膜覆土穴播对春小麦耗水、产量和土壤水分平衡的影响 [J]. *中国农业科学*, 2014, 47(22): 4392-4404.
- [22] 张平良, 郭天文, 侯慧芝, 等. 不同穴播种植方式与平衡施肥对旱地春小麦产量及水分利用效率的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(1): 132-136.
- [23] 王金牛, 谢忠奎, 郭志鸿, 等. 砂田退化对土壤温度和蒸发影响的模拟研究 [J]. *中国沙漠*, 2010, 30(2): 388-393.
- [24] 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.
- [25] 王珍, 冯浩, 吴淑芳. 秸秆不同还田方式对土壤低吸力段持水能力及蒸发特性的影响 [J]. *土壤学报*, 2011, 48 (3): 533-539.
- (上接第 201 页)
- [6] Broghei A M, Taghinejad J, Minaci S, et al. Effects of subsoiling on soil bulk density, penetration resistance and cotton yield in northwest of Iran [J]. *International Journal of Agricultural Biology*, 2008, 10(1): 120-123.
- [7] 董智. 东北玉米带秸秆覆盖免耕对土壤形状的影响 [J]. *玉米科学*, 2013, 21(5): 100-103, 108.
- [8] 沈其荣. *土壤肥科学通论* [M]. 北京: 高等教育出版, 2008, 96.
- [9] 鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005, 189-269.
- [10] 李顺鹏. *微生物学实验指导* [M]. 北京: 中国农业出版社, 2003, 78-79.
- [11] 何绍江, 陈雯莉. *微生物实验* [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007, 45-48.
- [12] 颜丽. 玉米秸秆还田时间和还田方式对土壤肥力和作物产量的影响 [J]. *土壤通报*, 2004, 35(2): 143-148.
- [13] Ramakrishna A, Tam H M, Wani S P, et al. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam [J]. *Field Crops Research*, 2006, 95(2/3): 115-125.
- [14] 李秀英, 赵秉强, 李絮花, 等. 不同施肥制度对土壤微生物的影响及其土壤肥力关系 [J]. *中国农业科学*, 2005, 38(8): 1591-1599.
- [15] 杨恒山, 张庆国, 刘晶, 等. 不同生长年限紫花苜蓿根系及其土壤微生物的分布 [J]. *草业科学*, 2007, 24(11): 38-41.
- [16] 萨如拉. 玉米秸秆低温降解复合菌系的筛选 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46(19): 4082-4090.
- [17] 刘佳斌, 李传宝, 王宏燕. 秸秆还田不同处理方式对黑土微生物量和土壤酶活性的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(9): 5285-5287.
- [18] Chaudhary A T M A, Kennedy I R. Nitrogen fertilizer losses from rice soils and control of environment pollution problems [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2005, 36(11/12): 2531-2537.
- [19] 萨如拉, 高聚林, 于晓芳, 等. 玉米秸秆深翻还田对土壤有益微生物和土壤酶活性的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(7): 138-143.
- [20] 陈东林, 易镇邪, 周文新, 等. 不同土壤耕作方式下秸秆还田量对晚稻土壤养分与微生物的影响 [J]. *环境科学学报*, 2010, 30(8): 1722-1728.
- [21] 慕平. 黄土高原农田综合地力及碳汇特征对连续多年玉米秸秆全量还田的响应 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012, 45-49.
- [22] 慕平, 张恩和, 王汉宁, 等. 不同年限全量秸秆还田对玉米生长发育及土壤理化性质的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(3): 291-296.