

亏缺灌溉与有机肥结合对夏玉米水分及产量影响

宿顺顺^{1,3}, 冯浩^{1,2,3}, 吴淑芳^{1,3}, 胡亚瑾^{1,3}, 陈光杰^{1,3}, 陈霁菲^{1,3}

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了解减少灌水量和尿素对夏玉米产量和水分的影响。通过田间试验,以夏玉米为研究对象,选取课题组研发的有机质含量高、保水性能强的有机肥,结合2个水平的灌溉(充分灌溉W1和亏缺灌溉W2),采用等氮的原则,对有机肥与无机肥混施(F1:100%无机化肥;F2:24%有机肥+76%无机化肥;F3:48%有机肥+52%无机化肥),研究灌水量与有机无机肥对夏玉米水分利用效率和产量的影响。结果表明:与F1处理相比,在充分灌溉(W1)条件下,F2和F3处理的籽粒产量提高4.8%~6.3%;亏缺灌溉(W2)条件下,有机肥处理的籽粒产量提高1.8%~2.3%。在相同灌溉水平下,有机肥处理显著提高收获时土壤贮水量,为冬小麦发芽和生长提供一定的湿度。施有机肥处理对三叶期和小喇叭口期株高有显著影响,而对其他生育期株高影响不显著。亏缺灌溉(W2)和施有机肥(F2)的处理产量较好,是夏玉米种植管理中的一个有效方案。这种灌溉施肥管理可为关中平原及环境相似地区提供科学依据。

关键词: 有机肥;聚丙烯酰胺;夏玉米;产量;水分利用效率;亏缺灌溉

中图分类号: S152.7⁺5; S513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0165-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.024

Effect of Deficit Irrigation Combined with Organic Fertilizer on Water Content and Yield of Summer Maize

SU Shunshun^{1,3}, FENG Hao^{1,2,3}, WU Shufang^{1,3}, HU Yajin^{1,3}, CHEN Guangjie^{1,3}, CHEN Jifei^{1,3}

(1.College of Water Resource and Architectural, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3.Institute of Water Saving Agriculture in Arid and Semiarid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: A field experiment was conducted to understand the effect of reducing irrigation amount and urea on summer maize yield and soil water, taking summer maize as the research object in Yangling of Shaanxi Province. The organic fertilizer with high organic matter content and strong water retention performance developed by the research group was selected, combined with two levels of irrigation (full irrigation W1 and deficit irrigation W2). According to the principle of equal nitrogen, the organic fertilizer and inorganic fertilizer were mixed with different ratios (F1: 100% inorganic fertilizer, F2: 24% organic fertilizer+76% inorganic fertilizer and F3: 48% organic fertilizer+52% inorganic fertilizer), and the effects of irrigation amount and organic and inorganic fertilizers on water use efficiency and yield of summer maize were studied. The results showed that under W1, the grain yields of F2 and F3 treatments increased by 4.8%~6.3% compared with F1; under W2, the grain yield of organic fertilizer treatment increased by 1.8%~2.3%. Under the same irrigation level, organic fertilizer treatment significantly increased soil water storage at harvest stage ($P < 0.05$), providing a certain humidity for winter wheat germination and growth. The application of organic fertilizer had a significant effect on the plant height at the three-leaf stage and the small trumpet stage, but had no significant effect on the plant height at other stages. The results of this study showed that the treatment of deficit irrigation (W2) and organic fertilizer (F2) was better, which was an

收稿日期: 2019-08-06

资助项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFC0403605); 杨凌示范区产学研用协同创新重大项目(2017CXY_12)

第一作者: 宿顺顺(1993—), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: 1821522933@qq.com

通信作者: 吴淑芳(1977—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: wsfsj@163.com

effective scheme for summer maize planting. This findings could provide a scientific basis for the optimal management of irrigation and fertilization in the Guanzhong Plain and other similar areas.

Keywords: organic fertilizer; polyacrylamide; summer maize; yield; water use efficiency; deficit irrigation

玉米是我国主要的粮食作物之一,近年来主要通过增施化肥,尤其是氮肥使玉米种植面积和产量不断提高^[1]。然而化肥的大量施用不仅造成土壤板结、肥力下降、可耕性降低等问题,严重损害了土壤的自我修复能力与生产力,威胁到农业可持续发展^[2]。为改善土壤结构、土壤肥力和作物产量而进行的新型土壤改良是农业研究的重要课题。

土壤改良剂,包括天然、合成和天然合成改良剂和生物改良剂,已被证明在改善土壤结构和减少环境污染方面发挥着重要作用^[3]。我国广泛使用的天然改良剂有油渣、药渣、菌渣和秸秆等,这些改良剂含有氮(N)、磷(P)、钾(K)等大量元素、微量元素和有机质等,是作物生长所必需的营养物质。这些天然改良剂也可用于生产有机肥,不仅可以改善土壤结构,而且可以提高土壤肥力。赵东彦等^[4]和钟元华等^[5]的研究表明,玉米秸

秆与风化煤的施用显著改善了土壤团聚体的形成,提高土壤有机质含量和腐殖质化系数。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

位于黄土高原南部旱作区的陕西杨凌西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院(34°16′56"N, 108°04′30"E),海拔 521 m,多年平均降水量 635.5 mm,降水量季节分配不均,主要集中在夏季(7—9 月);多年平均蒸发量 1 440 mm,属大陆性暖温带季风型半湿润气候区;年平均气温 12.9 ℃,年昼夜温差平均为 11.5 ℃,年日照时间为 2 196 h,无霜期为 169~200 d。试验时间为 2018 年 6—10 月,0—80 cm 土层的基本物理性质见表 1。气象数据由西北农林科技大学灌溉试验站提供,夏玉米全生育期的降水量和日平均气温见图 1。

表 1 试验地土壤基本物理性质

土层 深度/cm	容重/ (g·cm ⁻³)	田间持水量/ (g·g ⁻¹)	沙粒 (0.02~2 mm)	粉粒 (0.02~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)
0—20	1.2	22.2	30.5	30.5	27.9
20—40	1.6	22.4	56.2	27.4	17.5
40—60	1.4	26.3	63.0	22.6	14.4
60—80	1.4	26.0	33.3	43.5	22.2

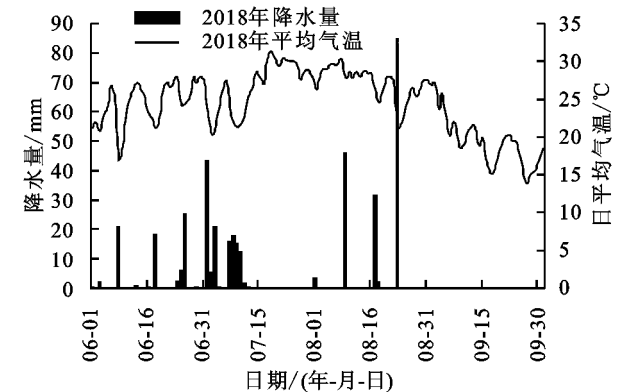


图 1 2018 年夏玉米降水量和日平均气温

1.2 有机肥的制备

新型有机肥重量百分比为:油渣 45%,作物秸秆 25%,食用菌菌渣 8%,钙镁磷肥或磷矿粉 4%,中药渣 5%,石灰或草木灰 3%,解淀粉芽孢杆菌 1%,活性炭或胶原蛋白 4%,聚丙烯酰胺 5%,原料的质量百分比之和为 100%。

新型有机肥研发过程为:将油渣、菌渣等原料经粉碎机粉碎加工过筛(筛底孔径为 8~10 mm)与氨化后的粉碎秸秆等有机物料进行混合放在发酵池中,加入发酵熟腐剂及粉饼等其他辅料,进行密封厌氧发

酵。待发酵好的有机物料与保水剂聚丙烯酰胺进行拌和,制成有机肥。

有机肥中的有机质、N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 79.2%,6.7%,2.3%和 0.3%。

1.3 试验设计

试验采用二因素随机区组设计,共 6 个处理: F1,100%无机化肥;F2,24%有机肥+76%无机化肥;F3,48%有机肥+52%无机化肥。肥料施用量: F1、F2 和 F3 处理是在等氮、磷的条件下,根据相应有机物料所含氮、磷量乘以其施用量,得到所施用有机物料的总氮、磷含量,其不足 225 kg/hm²氮和不足 150 kg/hm²磷的部分养分用化肥氮、磷补足。灌溉分为充分灌溉(W1)和亏缺灌溉(W2)(表 2)。

1.4 田间试验

供试夏玉米品种为“秦龙 11”,为当地推广的种植品种。2018 年 6 月 13 日播种,2018 年 10 月 1 日收获,共 110 天。玉米采用人工穴播,行距 60 cm,穴距 40 cm,种植密度为 53 000 株/hm²。种植小区长 4.5 m,宽 4 m,小区面积 18 m²,小区随机区组排列,每个处理 3 次重

复。肥料选用尿素(N—46.4%)和磷酸二铵(N—12%、P₂O₅—61%)(均为质量分数)。试供土壤为中壤土,当地化肥用量分别为 N 225 kg/hm², P₂O₅ 150 kg/hm², 肥力中等, 播种前一次性施入, 生育期不再施肥。

表 2 不同处理的施肥量和灌溉量

灌溉	施肥	有机肥用量/ (t·hm ⁻²)	来自有机肥 N/ (kg·hm ⁻²)	灌水 定额/mm	来自化肥 N/ (kg·hm ⁻²)	化肥 N 减少比例/%
W1	F1	0	0	60(JF)	225.00	0
	F2	4	53.44	60(JF)	171.56	24
	F3	8	106.88	60(JF)	118.12	48
W2	F1	0	0	30(JF)	225.00	0
	F2	4	53.44	30(JF)	171.56	24
	F3	8	106.88	30(JF)	118.12	48

注:有机肥的施用量分别按照 4、8 t/hm² 计算,然后按照 6.68% 的含氮量计算,再按当季矿化率 20% 计算纯氮量,之后再用尿素将 N 补齐到 225 kg/hm²。灌水定额表示在拔节期和灌浆期分别灌水 60、30 mm。

1.5 测定指标与方法

1.5.1 植株生长指标测定 在夏玉米的生育期内测定植株株高和叶面积指数(LAI)。每个小区选取有代表性植株 3 株,从茎基部与地上部分离,然后把各器官分离,放入烘箱中 105 ℃ 杀青 0.5 h, 75 ℃ 下烘干至恒重,采用电子天平称量并计算植株的地上部干物质量,最后换算成群体生物量。采用卷尺测量株高、叶片长度和最大宽度,计算叶面积指数,叶面积指数(LAI)计算公式:

$$LAI = \sum_{j=1}^k (0.75 l_j b_j / f) \tag{1}$$

式中: k 为叶片数; l_i 为单叶片长度(m); b_i 为单叶片最大宽度(m); f 为单株占地面积(m²)。

1.5.2 土壤水分测定 使用时域反射仪 Trim—TDR 测定土壤体积含水率,在每个小区中心位置安装 TDR 管,测定土层深度为 0—200 cm,其中 0—100 cm 土层每 10 cm 为 1 个深度间隔,100—200 cm 土层每 20 cm 为 1 个深度间隔。所有小区每 10 天测定 1 次土壤体积含水率,且每次降水前后加测 1 次。

土壤贮水量的计算公式为:

$$H = \sum_{i=1}^n 10 \theta_i h_i \tag{2}$$

式中: θ_i 为第 i 层土壤体积含水率(m³/m³); H 为土壤贮水量(mm); h_i 为第 i 层土壤厚度(cm); n 为所测土壤体积含水率时的层数。

1.5.3 产量与水分利用效率的测定 在玉米收获后进行产量及其构成要素测定,选取小区中间相邻 5 行玉米,连续取 10 株,风干后测定果穗穗长、穗粗、穗行数 and 行列数,脱粒后测定总质量、百粒质量和籽粒产量。根据作物产量和耗水量计算作物水分利用效率。

$$ET = W_1 - W_2 + P + I + K \tag{3}$$

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

式中: ET 为农田水分蒸散量(mm); W_1 、 W_2 为相邻 2 次取样 0—200 cm 土层蓄水量(mm); P 为作物生育期

降雨量(mm); I 为灌溉水量(mm); K 为时段内地下水补给量(mm); WUE 为水分利用效率(kg/(hm²·mm)); BY 为植物地上部产量(kg/hm²)。

由于该试验田地下水埋深为 5 m 以下,可视地下水补给量为零,且降水入渗深度不超过 2 m,可视深层渗漏为零。

1.6 统计分析

采用 Microsoft Excel 2013 软件进行数据处理,采用 SPSS 20.0 统计分析软件对试验数据进行方差分析,SigmaPlot 12.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 亏缺灌溉与有机肥对夏玉米生长的影响

在方差分析的基础上,从播种后 23~38 天时有有机肥处理对株高呈显著影响,但灌溉处理对株高影响不显著(表 3)。在播种后 23 天有机肥与灌溉水平的交互作用对植物株高影响显著($P < 0.05$)。从播种后 61~89 天时有有机肥处理对叶面积指数影响显著,有机肥和灌溉水平的交互作用对叶面积指数无显著影响。在播种后 50~89 天有机肥对干物质积累影响显著($P < 0.05$)。

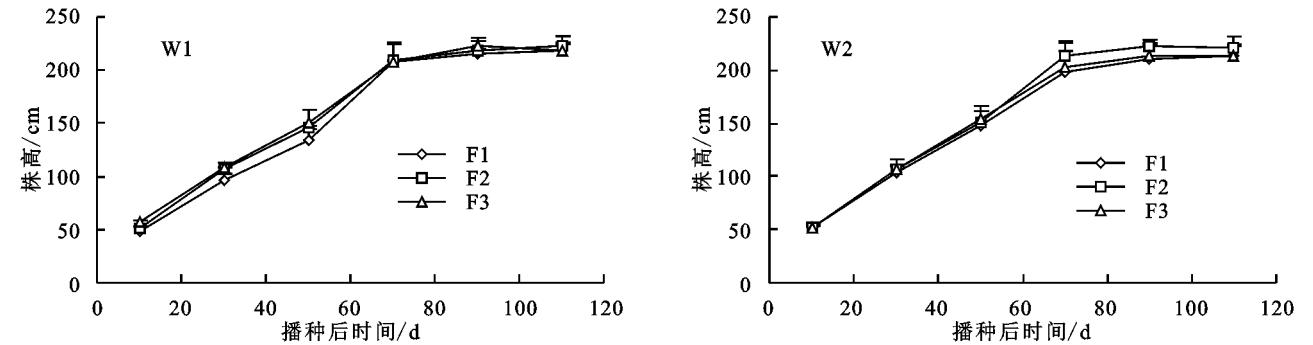
株高随生育期推进而不断增长,在三叶期(播后 23 天),与 W1F1 处理相比,W1F2 与 W1F3 处理株高增加 5.1%~17.0%;在小喇叭口期(播后 38 天),与 W1F1 处理相比,W1F2、W1F3、W2F2 和 W2F3 处理株高分别增加 10.0%,11.7%,10.1%和 9.5%,且与 W1F1 处理差异显著($P < 0.05$);在抽雄期(播后 50 天),在充分灌溉下与 F1 处理相比,F3 处理的株高显著增加 12.1%,有机肥 F2 与 F3 处理差异不显著($P > 0.05$);在亏缺灌溉下,F1、F2 和 F3 处理的株高无显著差异。随着有机肥量的增多,各处理在开花期(播后 89 天)与灌浆期(播后 110 天)差异不显著($P > 0.05$),有机肥 F2 处理与其他处理相比植株长

势较好。在夏玉米成熟期(播后 110 天),与 W1F1 处理相比,W1F2 处理株高显著增加 2.5%;在亏缺灌溉下,F2 比 F1 处理株高显著提高 3.5%,且 F2 与 F3 处理无显著差异($P>0.05$)(图 2)。

表 3 不同水肥处理对夏玉米株高、叶面积指数以及干物质累积量的影响

项目	处理	播种后天数/d					
		23	38	50	61	89	110
株高	施肥	0.003**	0.016*	0.589	0.615	0.586	0.541
	灌溉	0.637	0.397	0.122	0.677	0.373	0.383
	施肥×灌溉	0.012*	0.139	0.132	0.679	0.248	0.975
叶面积指数	施肥	0.106	0.292	0.073*	0.046*	0.038	0.068*
	灌溉	0.433	0.127	0.513	0.208	0.506	0.034*
	施肥×灌溉	0.799	0.648	0.118	0.884	0.109	0.865
干物质累积量	施肥	0.437	0.324	0.018*	0.049*	0.031*	0.255
	灌溉	0.181	0.932	0.252	0.842	0.564	0.003**
	施肥×灌溉	0.856	0.295	0.037*	0.392	0.496	0.006**

注: * 表示各处理间达显著水平($P<0.05$); ** 表示各处理间达极显著水平($P<0.01$)。下同。



注: W1 和 W2 分别表示充分灌溉和亏缺灌溉。下同。

图 2 不同水肥处理对夏玉米株高的影响

在夏玉米的不同生育时期,叶面积指数(LAI)随着有机肥用量增多也相应增加(图 3)。在播种后 23 天,施有机肥处理显著增加夏玉米叶面积指数(LAI),与 W1F1 处理相比,W1F2、W1F3、W2F2 和 W2F3 处理叶面积指数(LAI)分别增加 26.5%,35.0%,28.1%和 36.9%,有机肥处理叶面积指数(LAI)差异不明显($P>0.05$)。在播种后 50 天,充分灌溉条件

下,F2、F3 处理叶面积指数(LAI)比 F1 处理分别增加 37.7%和 35.4%,与 F1 处理差异显著,但 2 种有机肥处理差异不显著($P>0.05$);在亏缺灌溉下,F2、F3 处理叶面积指数(LAI)较 F1 处理分别增加 6.1%和 4.9%,3 种施肥处理显著性不明显。在播种后 89 天,夏玉米叶面积指数(LAI)在各处理中没有明显差异($P>0.05$)。

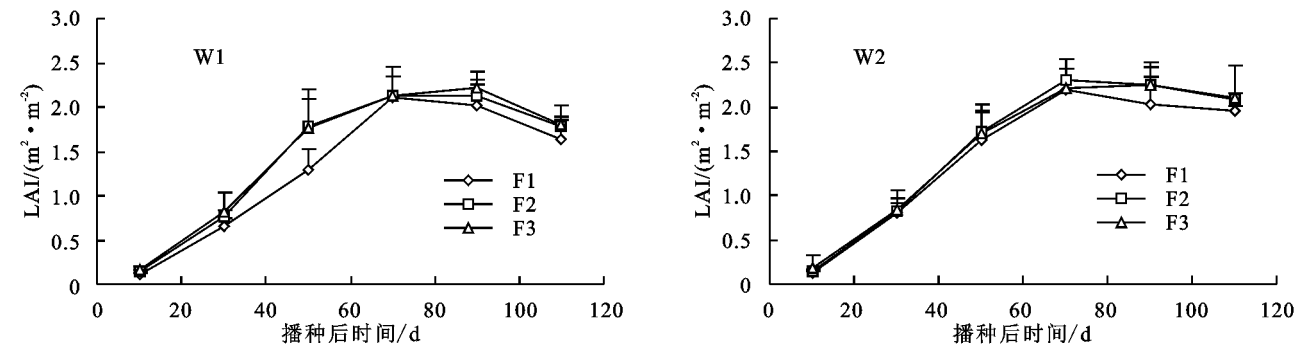


图 3 不同水肥处理对夏玉米 LAI 的影响

夏玉米干物质质量随着施有机肥的增加而增大(图 4)。在三叶期(播后 23 天),夏玉米干物质质量在各处理间无明显差异。在小喇叭口期(播后 38 天),与 W1F1 处理相比,W1F2、W1F3、W2F2 和 W2F3 处理

的干物质质量分别增加 5.4%,16.6%,12.7%和 19.9%,且各有机肥处理之间差异不明显。在抽雄期(播后 50 天),与 W1F1 处理相比,W1F2、W1F3、W2F2、W2F3 处理夏玉米干物质质量分别增加 37.4%,47.4%,42.8%和

48.1%,且与各处理间差异显著。在开花期(播后 61 天),传统灌溉下 F2、F3 与 F1 处理差异不显著,夏玉米干物质质量分别增加 9.3%和 1.2%;在亏缺灌溉下与 F1 处理相比,F2 和 F3 处理夏玉米干物质质量显著提高 10.1%~10.6%,与 F1 处理差异显著。在灌浆期(播后 89 天),W1F2、W1F3、W2F2 和 W2F3 处理

的夏玉米干物质质量与 W1F1 处理相比,分别增加 1.0%,3.9%,11.0%,8.7%。在成熟期(播后 110 天),传统灌溉下与 F1 处理相比,F2 和 F3 有机肥处理的夏玉米干物质质量显著增加 5.4%~17.0%;在亏缺灌溉下,与 F1 处理相比,F2、F3 处理夏玉米干物质质量显著提高 17.3%~25.2%。

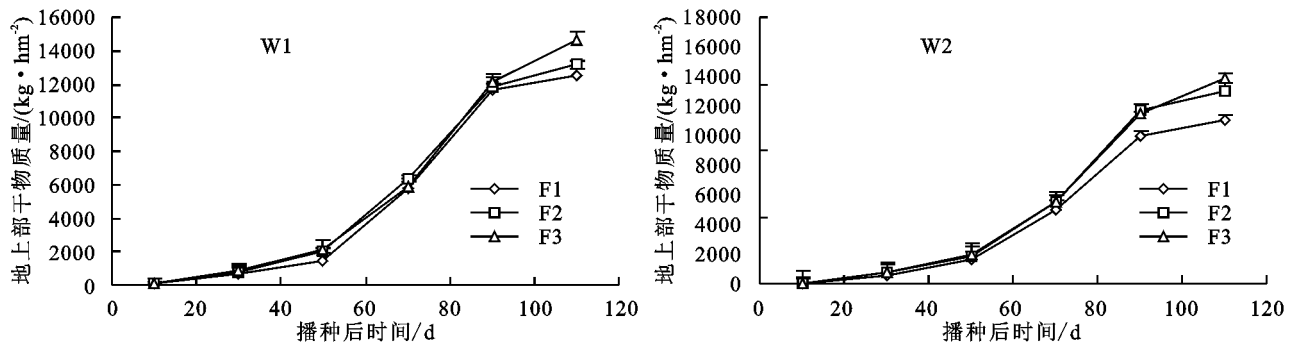


图4 不同水肥处理对夏玉米地上部干物质质量影响

2.2 亏缺灌溉与有机肥结合对土壤水分变化的影响

从图5可以看出,在玉米的生育期内不同处理相同深度间和相同处理不同深度间的土壤水分含量均存在明显差异,这主要与玉米生育时期、降雨量及气温等因素相关。在夏玉米拔节期,玉米生长初期各处理0—50 cm土壤水分含量均表现为先增大后减小,且在0—50 cm的土壤水分平均含量均表现为W2F3>W2F2>W2F1>W1F1>W1F2>W1F3,而当土层深度>50 cm时,相同土层各处理的土壤水分含量发生波动变化(图5a)。与夏玉米拔节期相比,抽雄期W1F1、W1F2、W1F3、W2F1、W2F2和W2F3处理在0—200 cm的土壤平均含水量分别增加20.2%,23.9%,22.1%,16.9%,15.3%和11.8%。这与测量前有效降雨的发生次数有关。在测量的前14天内,抽雄期共发生4次有效降雨(累计降雨量61.3 mm),直接导致各小区土壤水分含量的迅速增加(图5b)。随着玉米的生长发育,尽管期间2次降雨量较大,但受降雨次数、夏玉米生长耗水和气温逐渐升高的影响,各处理0—200 cm土壤水分含量整体明显下降,其中30—80 cm表现最为明显,W1F1、W1F2、W1F3、W2F1、W2F2和W2F3处理较抽雄期分别下降27.8%,30.5%,25.3%,32.7%,35.5%和34.9%。同时,相同深度各处理的土壤水分含量也随之发生变化,0—200 cm土层土壤水分平均含量表现为W1F3>W2F3>W1F2>W2F2>W1F1>W2F1(图5c)。由于连续高温天气以及短期(观测前14天)内有效降雨1次(3.2 mm)的影响,W1F1、W2F1处理的0—60 cm土壤水分含量显著低于W1F3、W2F3处理,W1F3、W2F3较W1F1处理保墒效果提高15.4%~20.6%。另外,

40—100 cm土层各处理土壤含水量的发生了波动变化(图5c),较大强度的降雨可迅速有效增加土壤中的水分含量,使各土层中土壤的水分条件得到大幅度改善。在2018年8月的3次暴雨过后(降雨量164.3 mm),各处理间不同土层的水分含量均大幅度提高,其中0—50 cm土层中降雨入渗补给的效果最为明显,与W1F1相比,W1F2、W1F3、W2F2和W2F3处理的土壤水分含量分别提高6.1%,9.1%,13.8%和26.3%(图5d)。玉米收获期各处理土壤水分含量与灌浆期相比均有不同程度回升,其中0—50 cm土层回升效果最为显著。同时,9月中下旬的平均气温比9月上旬低5.0℃,使得土壤水分的蒸发减少,并且夏玉米在收获期根系耗水量减少等综合因素的影响,最终导致各处理土壤水分含量均有所回升(图5e)。

有机肥是造成耗水量(ET)差异的主要因素。由图6可知,灌溉水平随植株增长对ET的影响逐渐减小。有机肥与灌溉对播种—拔节期的ET呈极显著影响,有机肥对拔节期—开花期的ET呈极显著影响,灌溉与施肥对开花期—成熟期的ET无显著影响。

在播种—拔节期,传统施肥处理的ET值显著高于有机肥的处理,说明有机肥的施用可能减少土壤蒸发,降低玉米的耗水量。在充分灌溉下,F2、F3比F1处理显著降低蒸散量10.0~13.8 mm。在亏缺灌溉下,F1与F2、F3处理的ET值差异显著。随着夏玉米的生长,有机肥处理的ET值较高。与传统处理相比,拔节期—开花期有机肥蒸散量显著增加。在亏缺灌溉下,F2和F3处理之间无显著性差异。在开花期—成熟期,各处理的蒸散差异减小,而有机肥与传统施肥处理的蒸散差异不显著。

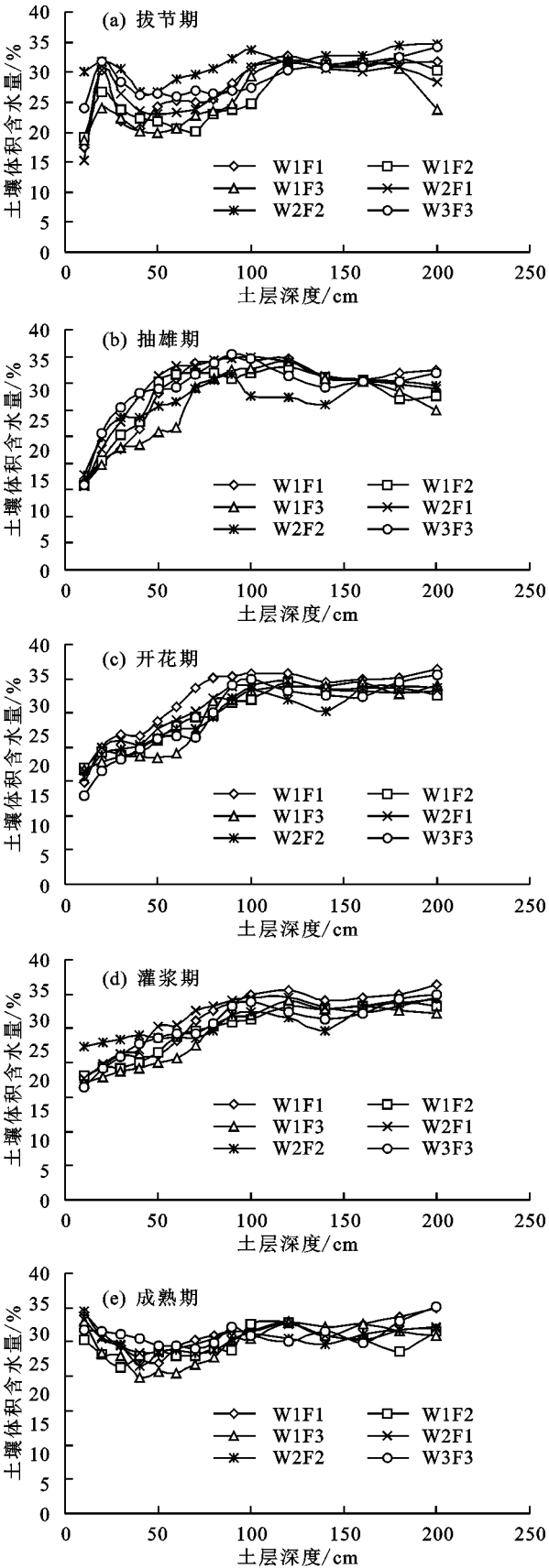
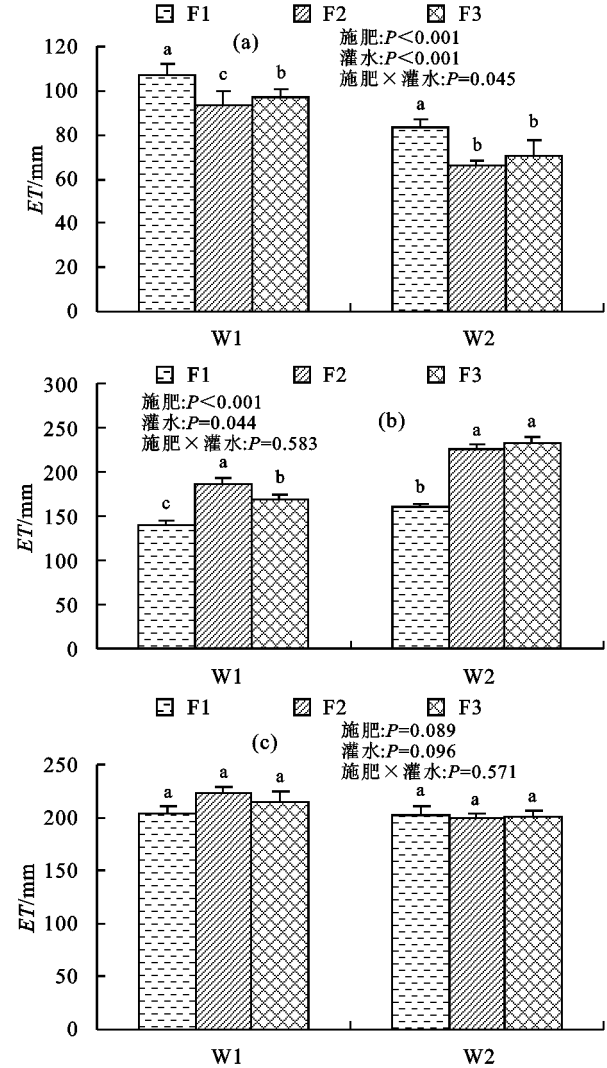


图 5 不同水肥处理对夏玉米 0—200 cm 土层土壤含水量的影响

2.3 亏缺灌溉与有机肥结合对产量及水分利用效率影响

由表 4 可知,施有机肥可显著提高玉米的籽粒产

量,亏缺灌溉与有机肥处理对玉米的籽粒产量及其构成要素有不同程度的影响。施有机肥对籽粒产量、穗长和穗粗均有极显著影响,灌溉对生物量和水分利用效率有极显著影响,水肥的交互作用对生物量和穗粗有极显著影响。



注:(a)为播种期—拔节期;(b)为拔节期—开花期;(c)为开花期—成熟期。

图 6 不同水肥处理对玉米蒸散量的影响

在传统灌溉下,F2、F3 处理的生物量较 F1 分别增加 17.0%和 5.4%,F1 与 F2 处理差异显著,F1 与 F3 处理差异不显著;在亏缺灌溉下,F2、F3 处理地上部生物量较 F1 处理分别提高 7.6%和 0.8%,各处理间差异不显著。亏缺灌溉处理的生物量和籽粒产量总体较高,亏缺灌溉下 8 t/hm²有机肥施用产量最高。在不同灌溉下,有机肥处理均表现出籽粒产量较高,在传统灌溉下,与 F1 处理相比,F2、F3 处理的籽粒产量分别提高 6.3%和 4.8%;在亏缺灌溉下,F2、F3 处理的籽粒产量分别提高 2.3%和 1.8%。在亏缺灌溉下,F2、F3 有机肥处理的 WUE 显著高于传统施肥处理,有机肥 F2 与 F3 处理的 WUE 差异不显著;W1F1 处理 WUE 明显低于

W1F2、W1F3、W2F2、W2F3 施肥处理,且与各处理间的 WUE 表现出显著性差异(表 4)。

表 4 不同水肥处理对夏玉米产量及水分利用效率的影响

灌溉	施肥	地上生物量/ (kg·hm ⁻²)	百粒重/ g	穗长/ cm	穗粗/ mm	穗行数	行粒数	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	WUE/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
W1	F1	12528.2c	29.6b	17.1bc	46.1cd	12.9b	37.7a	5510.4c	23.4c
	F2	14652.5a	32.8a	18.4a	50.4ab	13.8ab	39.6a	5860.2bc	32.7a
	F3	13199.9bc	30.3ab	17.4bc	46.6cd	13.1b	38.9a	5773.3bc	31.4ab
W2	F1	14281.8ab	28.0b	17.0c	45.0d	12.9b	38.4a	6144.1b	24.7bc
	F2	15371.9a	31.3ab	17.8ab	51.8a	14.0ab	39.6a	6287.3a	34.7a
	F3	14403.1ab	28.7b	17.4bc	48.1bc	14.4a	39.1a	6253.5a	32.4a
显著水平	灌溉	* *	NS	NS	NS	NS	NS	*	* *
	施肥	NS	*	* *	* *	*	NS	* *	*
	灌溉×施肥	* *	NS	NS	* *	NS	NS	NS	NS

在不同灌溉条件下,F2 与 F1 处理的穗长差异显著。在传统灌溉条件下,F2 和 F3 处理的穗长较 F1 处理分别提高 7.6%和 1.8%;亏缺灌溉条件下,F2 和 F3 处理穗长分别提高 4.7%和 2.4%。在传统灌溉下,F1 与 F2 处理的穗粗表现出显著性差异;在亏缺灌溉水平下,F1 与 F2、F3 处理的穗粗差异显著,F2、F3 处理比 F1 处理的穗粗分别提高 15.1%和 6.9%。

在传统灌溉水平下,F1、F2 和 F3 处理穗行数未表现出显著性差异;在亏缺灌水水平下 F2 和 F3 处理的穗行数较 F1 分别提高 8.5%和 11.6%,F1 与 F3 处理差异显著,与 F2 处理未表现出明显差异(表 4)。亏缺灌溉水平与传统灌溉处理下,F1、F2 和 F3 施肥行粒数无显著性差异。

3 讨论

土壤改良剂(油渣、秸秆渣、PAM)可减少土壤表面的非生产性水分损失,改善土壤水分状况,在田间水分管理和作物生长中发挥着重要作用^[6-7]。在早期成长阶段(拔节期),F2、F3 处理显著增加 2 个灌溉水平的土壤含水量(图 5a)。该结果与 Farrell 等^[8]的研究一致,后者报告了水凝胶的保水能力。在生长初期,小玉米植株耗水较少,与传统施肥处理相比,有机肥处理使土壤保持更多的水分,可能的解释为少量的高吸水性聚合物与有机和无机材料结合使用,可以最大限度地发挥各自的优势^[9]。表明秸秆与聚丙烯酰胺^[10]和尿素与聚丙烯酰胺^[11-12]对抑制蒸发、提高作物产量、提高水分利用效率(WUE)、土壤含水量具有显著影响。从抽雄期到成熟期(图 5),有机肥处理与常规施肥处理土壤含水量差异不显著。在这一生长阶段,与传统施肥处理相比,有机肥处理玉米的生长速度更快,导致作物冠层蒸腾作用更强,土壤剖面水分消耗更多。

ET 通常由土壤表面蒸腾和植物蒸腾组成,是生态系统水分平衡的重要组成部分^[13-15]。已有研究^[16-18]表明,土壤改良剂能有效抑制土壤蒸发,促进植物蒸腾,并为后期营养和生殖生长保存更多的土壤

水分。本研究不同处理对玉米生长季耗水量的影响不同(图 6),在播种期—拔节期,F2、F3 处理的土壤蒸散量小于 F1 处理。这一差异表明,由于聚丙烯酰胺与 N 肥互作,增加土壤中团聚体稳定性,减少土壤流失,改善土壤结构,抑制土壤水分蒸发,提高土壤吸水能力,增加土壤含水量,增加土壤的保水保肥能力,从而增加作物产量等^[19-20]。有机肥与化肥的耦合抑制了土壤水分蒸发,为植物生长提供了更大的水分供应。随着时间的推移,有机肥处理的玉米比常规施肥处理的玉米树冠生长更大,植物高度和叶面积较大(图 2 和图 3),导致拔节期—开花期有更大的 ET 值。在开花期—成熟期各处理间蒸散发差异减小,可能是生长后期需水量减少,导致累积蒸散发较拔节期降低,同时蒸发蒸腾值受灌溉水平的影响较大。

有机肥与无机肥的耦合作用提高了土壤含水量,维持植株生长所需的水分,从而增加植株高度和叶面积指数。在同一灌溉水平下,有机无机肥处理的株高和叶面积显著高于常规施肥处理(播种后 45 天)(图 2 和图 3)。本试验条件下,有机—无机缓释肥料耦合为夏玉米的生长发育提供了有利条件,不仅克服了无机肥肥效慢、养分含量低的缺点,而且保证作物生长后期的养分供应,有利于后期产量形成。这与史春余等^[21]的研究结果一致。W1 和 W2 灌水水平在株高上无显著差异,说明在亏缺灌溉条件下,有机肥与氮肥的耦合可能降低水分胁迫,改善植株水分状况。

本研究结果表明,亏缺灌溉水平下有机无机肥处理的籽粒产量和生物量较大,充分灌溉水平次之,说明在适当的亏灌下增加有机肥会增加籽粒产量和生物量。由于在作物的非关键生育时期实施亏缺灌溉,既能满足作物生理代谢需水,又能提高作物的抗逆性,诱导作物产生吸水补偿效应,显著增加作物水分利用效率^[22-23],说明作物生育期适宜的土壤水分亏缺和施氮量有利于作物生长、干物质积累及其向籽粒的转运,从而提高作物产量^[24-25]。

4 结 论

(1)施肥处理的影响高于灌水处理,且施肥处理对玉米叶面积和干物质积累的影响主要表现在播后 50 天。

(2)有机肥是造成耗水量(ET)差异的主要因素,灌溉水平随植株增长对 ET 的影响逐渐减小;除行粒数和地上部干物质,有机肥处理对产量及其构成要素影响显著。

(3)本试验的最佳水肥管理模式为亏缺灌溉和 24% 有机肥+76% 化肥,提高了玉米产量和水分利用效率。

(4)有机无机肥不仅改善了土壤条件,而且提高水分利用效率,使玉米在不影响作物产量的情况下正常生长,减少灌溉用水的投入,降低化肥的使用。由于水资源短缺是我国关中平原地区的一个严重问题,因此,有机无机肥的广泛应用是一种较有前途的管理措施。

参考文献:

- [1] Zhu S, Vivanco J M, Manter D K. Nitrogen fertilizer rate affects root exudation, the rhizosphere microbiome and nitrogen-use-efficiency of maize[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 107: 324-333.
- [2] 王志勇, 红梅, 杨殿林, 等. 供氮水平和有机无机配施对夏玉米产量及土壤硝态氮的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2008(6): 11-14.
- [3] Bhardwaj A K, Shainberg I, Goldstein D, et al. Water retention and hydraulic conductivity of cross-linked polyacrylamides in sandy soils[J]. *Soil Science Society America Journal*, 2007, 71: 406-412.
- [4] 赵东彦, 王海平. 玉米秸与风化煤配施对土壤结构性的影响[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 1999, 19(2): 135-137.
- [5] 钟元华. 玉米秸与风化煤配施对土壤有机质的影响[J]. *山西农业科学*, 2001(2): 35-36.
- [6] Busscher W J, Novak J M, Caesar-tonthat T C. Organic matter and polyacrylamide amendment of Norfolk loamy sand[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 93(1): 171-178.
- [7] Novak J M, Watts D W. Augmenting soil water storage using uncharred switchgrass and pyrolyzed biochars[J]. *Soil Use Manage*, 2013, 29: 98-104.
- [8] Farrell C, Ang X Q, Rayner J P. Water-retention additives increase plant available water in green roof substrates[J]. *Ecology Engineer*, 2013, 52: 112-118.
- [9] Huettermann A, Oriquiriza L J B, Agaba H. Application of superabsorbent polymers for improving the ecological chemistry of degraded or polluted lands[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2009, 37: 517-526.
- [10] 梁新华, 冯瑞云, 孟晋建, 等. 土壤改良剂扩蓄增容效果研究[J]. *山西农业科学*, 2009, 37(4): 53-55.
- [11] 张春强, 冯浩. PAM 和尿素混施对土壤入渗特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 109-113, 135.
- [12] 张春强, 冯浩. PAM 和尿素混施对土壤蒸发特性的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(5): 63-69.
- [13] Wang H, Wang C B, Zhao X M, et al. Mulching increases water-use efficiency of peach production on the rain fed semiarid Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Manage*, 2015, 154: 20-28.
- [14] Ding R S, Kang S Z, Zhang Y Q, et al. Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 127: 85-96.
- [15] Li X Y, Yang P L, Ren S M, et al. Modeling cherry orchard evapotranspiration based on an improved dual-source model[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(1): 12-18.
- [16] Ramos M C. Effects of compost amendment on the available soil water and grape yield in vineyards planted after land leveling[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 191: 67-76.
- [17] 杜社妮, 白岗栓, 赵世伟, 等. 沃特和 PAM 保水剂对土壤水分及马铃薯生长的影响研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(8): 72-79.
- [18] 杜社妮, 白岗栓, 赵世伟, 等. 沃特和 PAM 施用方式对土壤水分及玉米生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(11): 30-35.
- [19] Sojka R E, Lentz R D, Rose C W, et al. Polyacrylamide effects on infiltration in irrigated agriculture[J]. *Soil Water Conservation*, 1998, 53(4): 325-333.
- [20] Sojka R E, Entry J A, Orts W J, et al. Synthetic and bio-polymer use for runoff water quality management in irrigation agriculture[J]. *Water Science Technology*, 2005, 51(3): 107-115.
- [21] 史春余, 张夫道, 张树清, 等. 有机-无机缓释肥对番茄产量和氮肥利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(6): 584-587.
- [22] Jackson R B, Sperry J S, Dawson T E, et al. Root water up-take and transport: Using physiological processes in global predictions[J]. *Trends in Plant Science*, 2000, 5(11): 482-488.
- [23] Eapen D, Barroso M L, Ponce G, et al. Hydrotropism: Root growth responses to water[J]. *Trends in Plant Science*, 2005, 10(1): 44-50.
- [24] 史力超, 朱云, 翟勇, 等. 施氮对滴灌春小麦干物质积累、转运及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2015, 35(6): 844-849.
- [25] 张雨新, 张富仓, 邹海洋, 等. 生育期水分调控对河西地区滴灌春小麦生长和水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(1): 171-177.