

有机无机配施对旱地春玉米产量及土壤水分利用的影响

陈刚¹, 王璞^{1*}, 陶洪斌¹, 张中东²

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193; 2. 山西省农科院玉米研究所, 山西 忻州, 034000)

摘要: 通过田间试验, 研究夏旱发生年份有机无机配施对旱地春玉米产量及水分利用状况的影响。结果表明, 施肥处理显著提高旱地春玉米产量(1.49~2.63 t/hm²)和水分利用效率 *WUE* (41.3%~72.3%)、降水利用效率 *PUE* (45.7%~80.7%)。以有机无机配施的处理产量(5.89 t/hm²)和 *WUE* [13.15 kg/(hm²·mm)]、*PUE* [14.39 kg/(hm²·mm)] 最高。增施有机肥极显著降低了表层(0~40 cm)土壤容重, 增加了土壤总孔隙度, 提高了土壤的蓄水保墒能力。在夏旱发生前期, 由于降雨和土壤贮水稳定, 施肥处理尤其是有机肥处理能够提高表层(0~60 cm)土壤含水量, 60~200 cm 土层土壤含水量变化不明显。随着夏旱发生程度的加剧, 0~200 cm 土层含水量持续降低, 各处理的表层土壤含水量无明显差异。同时, 施肥处理条件下由于作物生长耗水量持续增加, 对深层土壤贮水消耗增加, 导致 40 cm 以下的土壤含水量较无肥处理下降较快。

关键词: 有机无机肥; 春玉米; 夏旱; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S147.34; S513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)06-0139-06

20 世纪 80 年代以来, 我国西北地区呈现出干旱化加强的趋势, 干旱频率超过了 80%^[1]。山西省位于黄土高原东部, 旱地面积占总耕地面积的 79.4%, 居北方旱区各省之首, 是我国典型的北方旱地农业区。据估算, 山西省旱地春玉米热量生产潜力为 13.4~20.0 t/hm², 降水生产潜力为 6.1~10.8 t/hm², 仅为热量生产潜力的 46%~54%, 产量的提升受到降水条件的限制^[2]。研究表明^[3,5], 培肥地力和提高水分利用效率是提高旱地玉米产量的关键, 而合理施肥、改善作物的营养状况是提高旱地作物水分利用的主要途径。尤其是在干旱年份, 玉米产量的提高更依赖于土壤水分及养分的协调供应^[4]。有研究表明^[6], 有机肥和化肥配施, 不仅可以提高肥料的利用效率, 还可以改善土壤的物理结构, 提高土壤保墒能力和增加植株的抗逆性。刘恩科等研究指出^[8], 施 N、P、K 化肥, 以及 N、P、K 化肥与有机肥配合施用, 均有利于提高玉米产量。朱平等在东北雨养旱地进行长达 30 a 的土壤定位培肥试验, 研究结果表明^[9], 有机无机肥配施有利于土壤有机质的积累, 改善耕层土壤理化性状, 稳定增加玉米产量。姜灿烂^[10]等针对我国南方红壤的研究表明, 在单施化肥的基础上有机肥的施入不仅有利于红壤旱地土壤大团聚体的形成, 还有利于改善土壤团聚体

结构及其稳定性。刘玉涛的研究结果表明^[11], 连年施用有机肥, 可提高土壤有机质和各种养分含量, 提高土壤供肥能力, 增强保水性能, 改善土壤结构。关于不同肥料种类对提高旱地水分利用效率和产量的作用的研究也很多^[12~16], 但是这些研究大都集中在一般的水分亏缺的基础上, 或者在设施条件下模拟干旱条件, 对于旱情持续发生过程中, 肥料对春玉米产量及农田水分利用状况的影响鲜有报道。本试验于 2010 年在山西省忻州市旱地进行, 在夏旱持续发生过程中, 研究了有机无机肥配施对旱地春玉米土壤产量形成和水分利用状况的影响, 旨在为旱区应对日益频发的季节性干旱, 提高旱地玉米产量和农田水分利用效率, 制定合理的施肥措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

试验于 2010 年 4 月至 10 月在山西省忻州市忻府区新路村(北纬 38°42', 东经 112°67')旱地上进行, 试验地海拔 858.3 m, 年均降水量 431.7 mm, 平均温度 9.07℃, ≥10℃积温 3 522.5℃, 无霜期 176 d, 年累计日照时数 2 590.5 h (1954—2010 年平均值)。土壤类型为浅褐土, 0~20 cm 土层有机质含量 8.22 g/kg, 速效氮 41 mg/kg, 速效钾 137.2 mg/kg, 速效磷

收稿日期: 2012-06-25

基金项目: 农业部公益性行业(农业)科研专项(201203031)

作者简介: 陈刚(1978—), 男, 安徽淮北人, 在读博士, 主要从事作物高产与资源高效利用研究。E-mail: chenxia88.66@163.com。

* 通信作者: 王璞(1957—), 男, 山西朔州人, 教授, 主要从事作物高产与资源高效利用研究。E-mail: wangpu@cau.edu.cn。

11.4 mg/kg, pH 值 8.14, 地下水埋深为 19.2 m。

2010 年试验期间, 年累计降水量 470.9 mm, 比多年平均降水量多 39.2 mm (1954—2010 年), 春玉米生长季 (5—9 月) 降水量 407.8 mm, 占年降水量的 86.6%, 并且高于多年平均降雨量 (367.5 mm), 总体上属于平水年份。但是, 6 月份和 7 月份累计降雨 73.5 mm, 只有多年同期降雨量的 46%, 这两个月的降水距平百分率为 -0.54, 超出 < -0.50 的特干旱标准^[17], 连续无效降雨 (≤ 10 mm) 日数达到 42 d, 也达到严重干旱等级。

1.2 试验方案

供试品种为郑单 958, 试验采用随机区组设计, 设 5 个处理, 每处理 3 次重复, 每小区面积 30 m² (长 6 m, 宽 5 m), 种植密度为 60 000 株/hm², 采取宽窄行种植 (宽行 80 cm, 窄行 40 cm), 前茬为春玉米。氮肥 (尿素, N 含量约 46%) 分别于播前和大喇叭口期按照 1:2 的比例施入, 播前一次性施入磷肥 (过磷

酸钙, P₂O₅ 含量约为 13%)、钾肥 (硫酸钾, K₂O 含量 50%) 和有机肥 (腐熟鸡粪和羊粪混合, 有机质含量 97.2 g/kg、全氮 4.01 g/kg、全磷 1.38 g/kg、全钾 22.6 g/kg) 做基肥。全生育期内无灌溉, 5 月 1 日播种, 10 月 6 日收获, 全生育期 157 d。

1.3 测定项目与方法

土壤含水量采用取土称重烘干法测定, 在播前、出苗后 10 d、大喇叭口期、吐丝期、吐丝后 25 d、收获后分 6 次在小区内取土。取土在窄行中间进行, 选择左右两边生长均匀的 4 株玉米, 使用土钻于中心处取土。每小区取两点, 取土深度为 2 m, 每 20 cm 一层, 每层土迅速混合均匀, 放入铝盒中, 盖好盒盖, 带回实验室将铝盒与湿土样称重, 然后放入烘箱内, 在 105℃ 条件下烘至恒重, 待冷却后称重。播前、收获后用环刀法测定土壤 0~20 cm, 20~40 cm 土壤容重, 土壤比重^[18]使用 2.65 g/cm³。

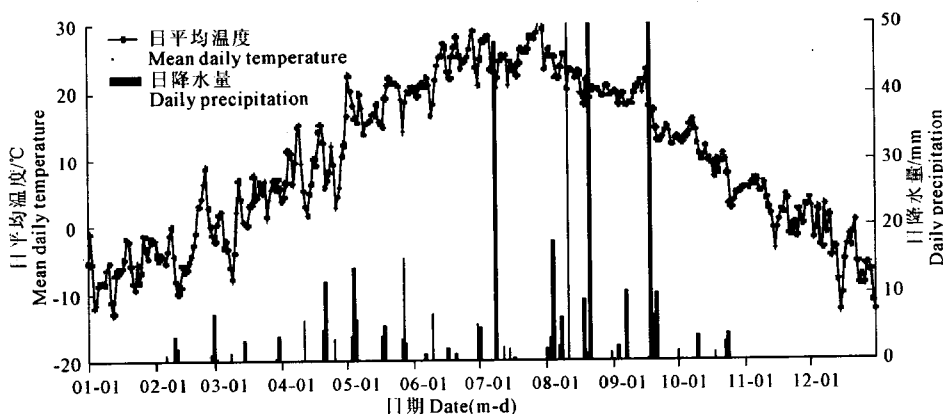


图 1 2010 年试验区降雨量和日平均温度

Fig.1 The daily precipitation and mean daily temperature in 2010

表 1 试验处理及代码

Table 1 Treatments and their codes

处理 Treatment	代码 Code	N (kg·hm ⁻²)	P (kg·hm ⁻²)	K (kg·hm ⁻²)	Manure (t·hm ⁻²)
CK	CK	0	0	0	0
N	A1	240	0	0	0
N + PK	A2	240	150	150	0
N + 有机肥 N + Manure	A3	240	0	0	45
N + PK + 有机肥 N + PK + Manure	A4	240	150	120	45

收获时, 每小区去除边行, 取中间 4 行, 每行选择 5 m 长, 取下全部果穗并称重, 根据所取实际穗数和总穗重, 按照重量比例随机选取 20 穗进行室内考种, 测定穗长、秃尖长、穗行数、行粒数、千粒重 (14% 含水量), 根据实际穗数、穗粒数、千粒重计算产量。

1.4 计算方法

土壤贮水量的计算:

$$W = \sum_{i=1}^{10} W_i \times D_i \times H_i \times 10/100$$

式中, W 为土壤贮水量 (mm); W_i 为第 i 层土壤重量含水量 (%); D_i 为第 i 层土壤容重 (g/cm³); H_i 为第 i 层土层厚度 (cm)。

水分利用效率 (WUE) 和降雨利用效率 (PUE) 的计算:

$$WUE = Y/E; PUE = Y/P$$

式中, WUE 水分利用效率 [kg/(hm²·mm)]; PUE 为降雨利用效率 [kg/(hm²·mm)]; Y 为作物经济产量 (kg/hm²); P 为生育期内降雨量 (mm)。

土壤总孔隙度 (%) = $100 \times (1 - \text{土壤容重} / \text{土壤比重})$, 土壤比重^[17]一般取其平均值为 2.65 g/cm³。

1.5 统计方法

用 DPS3.1 处理软件进行样本方差分析及 Duncan's 新复极差检验。

2 结果与分析

2.1 土壤水分变化

2.1.1 不同处理表层(0~40 cm)土壤容重和总孔隙度的变化 容重是土壤的重要物理性质,它影响到土壤的孔隙度与孔隙大小分布以及土壤的穿透阻力,进而对土壤水分的入渗产生影响^[19]。从表 2 中可以看出,收获期有机肥处理的表层(0~40 cm)土壤容重比其它处理低,且土壤总孔隙度高于其它处理,差异均达到极显著水平。虽然化肥处理下比无肥处理的表层(0~40 cm)土壤容重低、总孔隙度高,但均未达到显著水平。由此可见,施用有机肥能够显著降低土壤容重,提高土壤的总孔隙度,增强土壤的通气性,一方面通过改善旱地土壤结构,起到扩蓄增容的作用;同时,疏松的土壤环境也有利于作物根系在遇到干旱时迅速向下生长,提高作物的抗旱性。

表 2 不同肥料处理收获期(0~40 cm)土壤容重和总孔隙度变化

Table 2 The soil bulk density and soil total porosity at 0~40 cm soil depth after harvest

处理 Treatment	容重/(g·cm ⁻³) Soil bulk		总孔隙度/% Soil total porosity	
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
无肥 No fertilizer	1.30a	1.35a	50.8b	48.9b
化学肥料 Chemical fertilizer	1.29a	1.34a	51.1b	49.3b
有机肥 Organic fertilizer	1.26b	1.29b	52.4a	51.4a

注:小写字母分别表示在一列数据相同指标间在 $P < 0.05$ 水平上的差异显著性。

Note: Values followed by small letters within a column mean significant difference at 0.05 level.

2.1.2 夏旱发生不同阶段的土壤含水量变化 旱地降雨具有季节性变异的特点,而且同一季节内降水也呈不规律性,因而引起的干旱胁迫是一种散见性的,土壤水分表现为时多时少。从播种到出苗后 10 d,试验区累计降雨 32.3 mm,平均温度 17.7℃。由于苗期玉米生长速度较慢,虽然日降雨量仅有 1.47 mm,但作物生长未受影响。从图 2 中可以看出,表层(0~60 cm)土壤含水量以有机肥的处理(A4、A3)分别比无肥处理高 1.2% 和 1.1%;其次是化肥处理(A2、A1),略高于无肥处理。140 cm 以下土层含水量各处理之间差异不大。说明在土壤水分

供应基本稳定的情况下,有机无机肥配施比单纯施用化肥有较好的蓄水保墒的作用。由于春玉米生长前期需水量较少,耐旱性较强,作物生长对 60 cm 以下的土壤含水量影响较小,土壤深层水库较稳定。

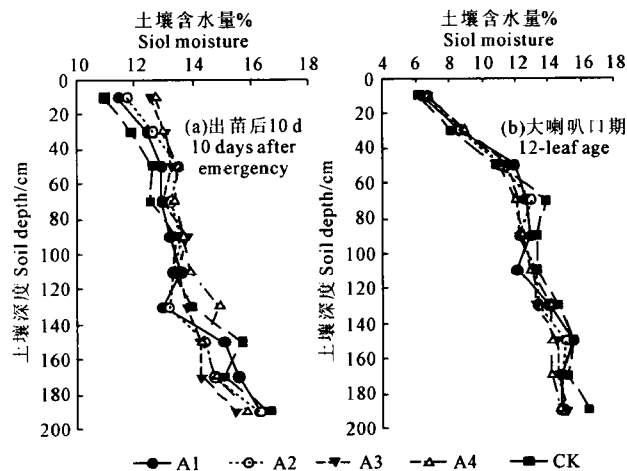


图 2 夏旱发生前期各处理 0~200 cm 土壤含水量

Fig.2 The soil moisture in 0~200 cm soil layer during the early period of summer drought

从出苗后 10 d 到大喇叭口期累计降雨 31.4 mm,期间的 6 次降水中,仅有 1 次降水超过 10 mm,连续无效降水(≤ 10 mm)超过 20 d,属于中度干旱^[17]。由图 3 中可以看出,各处理土壤表层(0~60 cm)含水量逐渐降低,最低的无肥处理(CK)仅有 6.2%,最高的氮磷钾肥和有机肥配合施用处理也仅达到 6.8%,差异很小。由于旱情发生时间较短,期间还有一次降雨(15.4 mm)补给,所以 60 cm 以下土层含水量受旱情影响较小,变化幅度不大。这说明各种肥料处理在遇到中度干旱时保水效果并不明显。由于有机肥仅施于地表,在干旱持续较长时间的情况下,地表蒸发同样严重,蓄水保墒作用受到限制。

从大喇叭口期到吐丝期期间累计降雨 61.7 mm,前期连续无降雨天数达到 19 d,与上阶段累加,连续无效降雨天数已经达到 42 d,属于严重干旱等级,作物生长受到严重影响,土壤含水量变化剧烈。由于后期有一次 47.4 mm 的降雨,表层(0~40 cm)土壤含水得到及时补充,均比前一阶段土壤(0~40 cm)含水量高,其中有机肥处理(A4、A3)表层(0~40 cm)土壤含水量最高,达到 7.3%,其次是化肥处理(7.1%),无肥处理最低(6.8%)。说明,有机肥在严重旱情发生后,遇到降雨,表层(0~40 cm)土壤由于土壤容重较低,总孔隙度较大,蓄水能力强,土壤含水量增加快。40 cm 以下土壤含水量较前一时段都有所下降,其中施肥各处理的深层土壤含水量下降较无肥处理快。说明施肥促进了作物根系的生长,

使根系可以较早期地进入土壤深层,从而有效地吸收了冬闲期贮存在深层土壤的水分,增强了作物对深层水的利用能力。

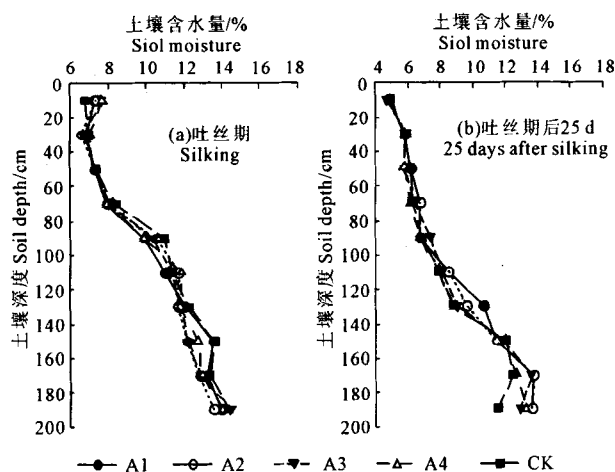


图 3 夏旱发生前期各处理 0~200 cm 土壤含水量

Fig. 3 The soil moisture in 0~200 cm soil layer during the spring drought

从吐丝期到吐丝后 25 d, 累计降雨 27.5 mm, 前期连续无降雨天数达到 21 d, 旱情仍在加剧。此阶段是作物需水关键时期, 连续的干旱直接影响到作物产量的形成。由图 3 中可以看出, 吐丝后 25 d 0~200 cm 土壤含水量较前一时期持续下降, 0~20 cm 土壤含水量 < 5%, 0~120 cm 土壤含水量均小于 10%, 各处理之间差异很小。这说明在严重干旱持续时间较长的情况下, 有机肥处理由于表层(0~40

cm) 土壤总孔隙度大, 水分散失, 保水作用不明显。

在旱地条件下, 合理施用有机肥和无机肥可以改善农田土壤环境, 增强土壤保水能力, 并通过改善作物的营养环境, 增强了作物对深层土壤水分的利用, 是一项行之有效的抗旱措施。在遇到旱情持续时间长的情况下, 可以考虑将有机肥深施以充分利用有机肥蓄水保墒的能力。

2.2 产量及水分利用效率

2.2.1 有机无机肥配施对产量及其构成因素的影响 试验结果表明, 在严重夏旱发生年份, 旱地春玉米产量水平较低, 最高产量仅达到 5.89 t/hm²。从表 3 中可以看出, 施肥对旱地春玉米具有极显著的增产效果。施肥与不施肥相比, 产量相差 1.49~2.63 t/hm², 单施氮肥增产较低, 氮磷钾肥和有机肥配合施用增产最高。在氮磷钾肥的基础上增施有机肥(A4)比单纯的氮磷钾肥(A2)增产 0.25 t/hm², 在 $P < 0.05$ 的水平上差异显著, 但未达到极显著水平; 单施氮肥(A1)与氮肥与有机肥配合施用(A3)相比产量降低 0.34 t/hm², 达到极显著水平。说明虽然夏旱发生严重, 增施有机肥仍然能够显著提高作物产量。氮磷钾肥处理(A2)比氮肥和有机肥混施处理(A1)增产 0.89 t/hm², 且达到极显著水平, 而且氮磷钾肥(A2)比氮肥(A1)增产 18.7%, 比氮肥有机肥配合施用的增产幅度(7.1%)要高。反映出在同样的施氮量下, 夏旱影响了有机肥中有效磷钾作用的充分发挥, 导致产量增幅降低。

表 3 不同肥料处理的产量及其构成因素

Table 3 The yield and it's components in different fertilizer treatments

处理 Treatment	产量 Yield (t/hm ²)	穗数 Ear	穗长 Ear length /cm	秃尖长 Barren length /cm	穗行数 Ear row number	行粒数 Kernels per row	千粒重 1000-grain weight/g
A1	4.75d	46139b	17.1ab	2.3b	14.7a	22.1b	318.0a
A2	5.64b	49278a	15.9b	2.3b	15.1a	23.6a	319.8a
A3	5.09c	49317a	19.8ab	2.6ab	14.7a	22.1b	318.8a
A4	5.89a	51417a	21.8a	1.9b	15.3a	23.2ab	322.3a
CK	3.26e	40722c	15.4b	3.1a	13.5b	20.4c	291.2b

注: 小写字母分别表示在一列数据在 $P < 0.05$ 水平上的差异显著性。千粒重和产量含水量均为 14%。下同。

Note: Values followed by small letters within a column mean significant difference at 0.05 level. The water contents of yield and 1000-grain weight are both 14%. They are the same as below.

对产量构成因素的分析发现, 施肥处理的产量构成因素与不施肥处理均达到极显著差异, 各施肥处理之间产量构成因素差异不显著。其中, 在施肥的 4 个处理中, A4、A3、A2 处理的穗数显著高于 A1 处理, A2 处理的行粒数显著高于 A3、A1, 而与 A4 差异不显著, 各处理之间穗行数和千粒重差异不显著。说明, 在本试验条件下, 施肥较对照在优化产量结构

方面作用显著, 在同样的施氮条件下, 磷、钾肥能够显著提高春玉米的穗数和行粒数, 对穗行数和千粒重影响较小。对产量构成因素与产量进行回归分析结果表明, 穗数 ($r = 0.979^{**}$)、穗行数 ($r = 0.993^{**}$)、行粒数 ($r = 0.959^{**}$)、千粒重 ($r = 0.983^{**}$) 都与产量达到极显著正相关, 秃尖长 ($r = -0.913^{*}$) 与产量达到极显著的负相关, 穗长 ($r =$

0.759)与产量之间未达到显著水平。以上结果表明,春玉米产量受到严重的夏旱影响,各产量构成因素均对产量提高起到极显著的作用,产量各构成因素均具有较高的提升潜力。

2.2.2 有机无机肥配施对 *WUE* 和 *PUE* 的影响

在产量水平上对 *WUE* 的分析是衡量节水措施的一项重要指标,而 *PUE* 则反映了旱地农业中降雨的生产潜力^[12]。从图4可以看出,施肥处理 *WUE* 和 *PUE* 分别比不施肥处理增加 41.3%~72.3% 和 45.7%~80.7%,均达到极显著水平。增施有机肥处理(A4、A3)的 *WUE* 比分别单纯施用化肥处理(A2、A1)高 0.33 kg/(hm²·mm) 和 0.68 kg/(hm²·mm);在对 *PUE* 的分析中,各处理所表现的规律相同,除氮磷钾肥与有机肥配合施用处理(A4)和氮磷钾肥处理(A2)的 *WUE* 差异不显著外,其它都达到显著水平。反映出有机肥对于提高旱地春玉米 *WUE* 和 *PUE* 作用明显。与产量分析结果相同,氮磷钾肥处理(A2)相对于单施氮肥(A1)在提高 *WUE* 和 *PUE* 方面要比氮肥和有机肥配合处理(A3)使用相对于氮肥处理(A1)效果明显。由此可以推断,在严重的夏旱影响下,有机肥的肥效释放受到了影响,在提高 *WUE* 和 *PUE* 方面的作用低于速效磷钾肥。

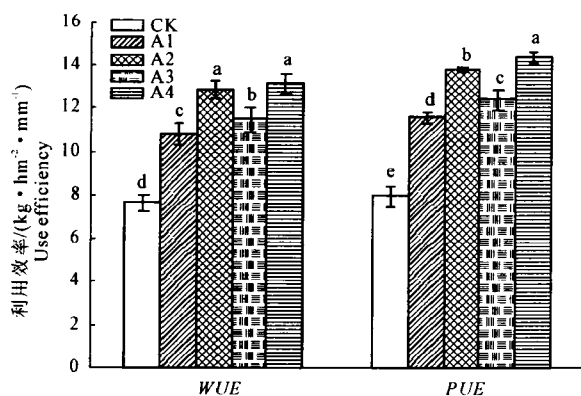


图4 春玉米水分利用效率和降雨利用效率

Fig.4 *WUE* and *PUE* of spring maize

3 结论与讨论

马耀华等对旱地土壤培肥进行研究后指出^[20],有机肥和化肥合理配施,能提高土壤的有机碳含量,促进土壤无机有机复合胶体的形成,有助于改良土壤结构,增大土壤保水能力,增加土壤养分,改善作物营养状况,增强作物利用深层土壤水分的能力,提高作物的水分生产效率。本试验结果表明,在充足降雨量和土壤供水充分的情况下,增施有机肥通过降低土壤容重和提高土壤的总孔隙度,从而改善土壤环境,可以提高土壤表层(0~60 cm)土壤含水量。

作物耗水主要来自降水,深层(60~200 cm)土壤含水量变化相对缓慢。旱情发生后,有机肥处理由于施肥较浅,地表蒸发同样严重,表层土壤含水量各处理之间差异不显著。在干旱持续发生期间,有效降水能够及时补给表层土壤含水,有机肥的蓄水保墒作用明显。由于施肥能促进根系发育,增强根系活性,从而促进了作物对深层土壤水分的利用。本试验条件下,持续的干旱增加了玉米对深层土壤贮水的利用,有机肥处理促进了作物根系的生长,增加了对深层地下水的吸收量。有研究表明,地表覆盖^[16,22-23]可以显著降低表层土壤的水分散失,因此,在旱作区增施有机肥的基础上采取适当的覆盖方式,将有助于解决这一问题。

合理施肥、改善作物的营养状况是提高旱地作物水分利用的关键。在遭遇严重夏旱的情况下,产量维持在较低水平。但是,施肥仍然可以在一定程度上显著提高旱地春玉米产量,施肥比不施肥产量增加 1.49~2.63 t/hm²。相同施氮条件下,增施有机肥对产量的贡献作用显著。由于旱情严重,影响了有机肥肥效的充分释放,使得在相同施氮量的情况下,有机肥的增产效果显著低于磷钾肥。由于产量水平较低,产量构成因素均对产量提高起到极显著的作用,各因素之间并没有显著的负相关影响,产量各构成因素具有较高的提升潜力。严重的夏旱影响了玉米的生长,“库”、“源”都维持在较低水平,并没有形成矛盾,因此,旱地春玉米产量提升空间很大,应该注重有机肥的合理施用。

WUE 和 *PUE* 是衡量旱地作物生产中水资源利用效率的重要指标,旱地土壤耕作措施、地表覆盖、保护性耕作、合理施肥等方面的研究^[19-23]都集中在如何提高 *WUE* 和 *PUE*。本研究结果表明,施肥可以显著提高 *WUE* 和 *PUE*。相同的施氮条件下,增施有机肥可以显著提高 *WUE*、极显著提高 *PUE*。试验中,在相同的施氮条件下,磷钾肥对于提高 *WUE* 和 *PUE* 的作用显著高于有机肥,应该深入探讨其中的机理。

由于在半干旱条件下年降雨量的不规律性,季节性干旱持续时间长短的不确定性,都影响了旱地农田土壤水分和养分的有效性,有机肥在土壤环境中的作用非常复杂,肥效释放也需要一个很长的过程,仅用一年的研究难免有一些疏漏。对水肥耦合的研究应该进行长期的定位试验才能够得出更加科学、准确的结论,才能为旱地农业生产中制定合理的施肥措施提供准确的科学指导。

参考文献:

- [1] 李生秀,李世清,高亚军,等.施用氮肥对提高旱地作物利用土壤水分的作用机理和效果[J].干旱地区农业研究,1994,12(1): 38-46.
- [2] 信乃诠.中国北方旱区农业研究[M].北京:中国农业出版社, 2002:567-569.
- [3] 李生秀.中国旱地农业[M].北京,中国农业出版社,2004:31-35.
- [4] Deng X P, Shan L, Zhang H P, et al. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China[J]. Agric Water Manage, 2006,80:23-40.
- [5] 周怀平,杨治平,李红梅.施肥和降水年型对旱地玉米产量及水分利用的影响[J].农业工程学报,2003,19(增刊):151-155.
- [6] Nangia Vinay, Turrall Hugh, Molden David. Increasing water productivity with improved N fertilizer management [J]. Irrigation and Drainage Systems, 2008,22(3-4):193-207.
- [7] 孙文涛,宫亮,包红静,等.不同有机无机配比对玉米产量及土壤物理性质的影响[J].中国农学通报,2011,27(3):80-84.
- [8] 刘恩科,赵秉强,胡昌浩,等.长期不同施肥制度对玉米产量和品质的影响[J].中国农业科学,2004,37(5):711-716.
- [9] 朱平,彭畅,高洪军,等.长期培肥对土壤肥力及玉米产量的影响[J].玉米科学,2009,17(6):105-108,111.
- [10] 姜灿灿,何园球,刘晓利,等.长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J].土壤学报,2010,47(4):716-722.
- [11] 刘玉涛.旱地玉米施用有机肥的定位研究[J].玉米科学, 2003,11(2):86-88.
- [12] 王珍,冯浩,吴普特,等.土壤扩蓄增容肥对春玉米产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2009,11(25):114-119.
- [13] 李宗新,董树亭,胡昌浩,等.有机无机肥互作对玉米产量及耕层土壤特性的影响[J].玉米科学,2004,12(3):100-102.
- [14] 王晓娟,贾志宽,梁连友,等.旱地有机培肥对玉米产量和水分利用效率的影响[J].西北农业学报,2009,18(2):93-97.
- [15] 高亚军,李生秀,田霄鸿,等.不同供肥条件下水分分配对旱地玉米产量的影响[J].作物学报,2006,32(3):415-422.
- [16] Wang Xiaobin, Dai Kuai, Zhang Dingchen, et al. Dryland maize yields and water use efficiency in response to tillage/crop stubble and nutrient management practices in China[J]. Field Crops Research, 2011,120:47-57.
- [17] 国家气候中心,中国气象科学研究院,国家气象中心,中国气象局预测减灾司.GB/T 20481-2006.气象干旱等级[S].2006.
- [18] 范业宽,叶坤合.土壤肥科学[M].武汉:武汉大学出版社, 2002:41.
- [19] 罗珠珠,黄高宝,张国盛.保护性耕作对黄土高原旱地表土容重和水分入渗的影响[J].干旱地区农业研究,2005,23(4):7-11.
- [20] 马耀华,张一平,查公良,等.旱地土壤培肥之研究——有机肥料对土壤有机无机复合状况及水分利用中的影响[J].干旱地区农业研究,1984,(3):69-78.
- [21] 胡恒宇,李增嘉,宁堂原,等.深松和尿素类型对不同玉米品种水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2011,44(9):1963-1972.
- [22] 张雷,牛芬菊,李小燕,等.旱地全膜双垄沟播秋覆膜对玉米产量和水分利用率的影响[J].中国农学通报,2010,26(22): 142-145.
- [23] 李尚中,王勇,樊廷录,等.旱地玉米不同覆膜方式的水温及增产效应[J].中国农业科学,2010,43(5):922-931.

Effects of combined application of organic and chemical fertilizers on the yield and water utilization of spring maize in dryland

CHEN Gang¹, WANG Pu^{1*}, TAO Hong-bin¹, ZHANG Zhong-dong²

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Maize Research Institute, Shanxi Academy of Agriculture Sciences, Xinzhou 034000, China)

Abstract: Field experiment was settled to study effects of combined application of organic and chemical fertilizers on the yield and water utilization of spring maize during summer drought in dryland. The results showed that the yields were more significantly increased from 1.49 t/hm² to 2.63 t/hm² with the fertilizers application than the treatment without applying any fertilizer (CK), the WUE(water use efficiency) were from 41.3% to 72.3% and the PUE(precipitation use efficiency) were from 45.7% to 80.7%. Furthermore, the yield (5.89 t/hm²), WUE [13.15 kg/(hm²·mm)] and PUE [14.39 kg/(hm²·mm)] were the highest with the combined application of organic and chemical fertilizers. The soil bulk density in 0~40 cm soil depth decreased significantly with the organic fertilization while the soil total porosity increased. Hence, organic fertilizer effectively enhanced the capacity of water retention in the depth of 0~40 cm soil layer. In the early period of summer drought, the soil moisture in the depth of 0~60 cm was improved with the fertilizer application, especially the combined application of organic and chemical fertilizers because the normal precipitation and soil storage. Meanwhile, the soil moisture in the depth of 60~200 cm soil layer did not change obviously. The soil moisture of 0~200 cm soil layer decreased constantly with the summer drought intensifying and the surface soil moisture were similar among treatments. While the soil moisture in deep soil depth (40~200 cm) of the fertilizer treatments decreased much more than CK because of faster growing and more water consumption.

Keywords: organic and chemical fertilizers; spring maize; summer drought; yield; water use efficiency(WUE)