

施肥管理对东北黑土区玉米耗水量的影响

邹文秀¹, 韩晓增^{1①}, 王守宇¹, 江恒^{1,2}, 杨春葆¹ (1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土区农业生态国家重点实验室/ 海伦农田生态系统国家野外观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以东北黑土区长期定位试验为基础, 选取 2000、2003、2005 和 2007 年为研究时段, 分析不施肥 (CK) 以及化肥 (NP) 和化肥 + 有机肥 (NPM) 施用对玉米耗水量和土壤供水量的影响。结果表明, 玉米的耗水高峰出现在拔节—抽雄期和抽雄—成熟期, 这 2 个阶段的耗水模数分别为 24.41% 和 47.07%, 全生育期的平均耗水强度为 3.64 mm · d⁻¹。降水量和降水的分配显著影响玉米的耗水特征。肥料的施用可明显增加玉米在干旱年份和生长季某干旱时期的耗水量, 并显著增加玉米的水分利用效率, 其中以 NPM 处理的效果较好。各处理土壤含水量由高到低依次为 NPM、NP 和 CK 处理。因此在东北黑土区, 有机肥和化肥配施是提高玉米的水分利用效率以缓解季节性干旱胁迫的有效途径。

关键词: 黑土; 施肥管理; 玉米耗水量; 土壤供水

中图分类号: S365 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2012)06-0681-06

Water Consumption by Maize Under Different Fertilization Managements in Black Soil Zone of Northeast China.

ZOU Wen-xiu¹, HAN Xiao-zeng¹, WANG Shou-yu¹, JIANG Heng^{1,2}, YANG Chun-bao¹ (1. Key Laboratory of Mollisols Agroecology/ National Observation Station of Hailun Agroecology System, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the long-term field experiment in the black soil region of Northeast China, effects of fertilization, designed to have CK (no fertilizer), Treatment NP (chemical fertilizer) and Treatment NPM (chemical fertilizer plus pig manure), on water consumption of maize and soil water supply capacity were analyzed, using the data in 2000, 2003, 2005 and 2007. Results show that the peak of water consumption by maize was observed during the jointing-tasseling stage and tasseling-maturity, reaching 24.41% and 47.07% in water consumption module, respectively, and the average water consumption intensity of the crop throughout the whole growth period was 3.64 mm · d⁻¹. The characteristics were significantly affected by amount and distribution of rainfall. Higher water consumption and higher water consumption efficiency were found in Treatments NP and NPM in droughty years and some droughty periods during the maize growing season. In terms of soil water supply, the three treatments followed a decreasing order of NPM > NP > CK. So, application of pig manure in combination of chemical fertilizer is an effective practice to increase the soil water utilization efficiency of maize and mitigate seasonal drought stress.

Key words: black soil; fertilization practice; water consumption of maize; soil water supply

中国东北黑土区是世界 4 大黑土区之一, 该区域粮食生产条件优越, 是我国重要的商品农业基地。东北黑土区总面积 7 684 万 hm², 耕地 2 204 万 hm², 其中玉米种植面积约 388 万 hm², 近年来随着种植结构调整, 玉米种植面积有增加趋势^[1]。

降水是影响玉米生长状况和产量高低的重要因素。生育期内降水量较少可能导致玉米生育期推迟以及生育期延长, 进而影响玉米的耗水和产量^[2]。王静等^[3]研究发现在全球气候变化背景下, 黑土区玉米生长季内降水量占年降水量的比例以及最长连续降水日数均表现为下降趋势, 使得玉米生产面临的潜在干旱风险增加。已有研究表明, 0 ~

100 cm 深度农田黑土的田间持水量为 387 mm, 土壤最大储水量为 575 mm, 土壤有效储水量为 242 mm^[4-5]。这说明农田黑土具有较大的储水库容, 土壤水库作用很强。如何发挥黑土的土壤水库作用, 增加玉米对土壤储存水分的利用率, 对于缓解干旱胁迫具有重要意义, 也是当前研究的一个重要方向。笔者所在研究小组在东北黑土区的前期研究

收稿日期: 2012-02-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2011CB100506); 国家自然科学基金 (40971152, 41101208)

① 通信作者 E-mail: xzhan@neigaeherb.ac.cn

发现,在干旱年份,肥料的施用不仅能够增加土壤有机碳含量^[6],也能够增加玉米对土壤水分的利用效率,缓解干旱胁迫,增加玉米产量,其中,有机肥的施用效果最显著^[7],但是该试验观测期仅1 a,缺乏长期观测数据的支持和对不同降水年型的考虑。因此,笔者以中国科学院海伦农田生态系统野外科学观测研究站内水分观测场的长期定位试验为基础,研究施肥管理对玉米耗水特征、土壤供水特征和水分利用效率的影响,旨在为探寻黑土区合理的土壤水分调控措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在中国科学院海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站水肥耦合试验场进行,该站地处黑土区中部,地势平坦,属于温带大陆性季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,年平均气温1.5℃,极端最高温度37.0℃,极端最低温度-39.5℃,年降水量500~600 mm,且主要集中在7—9月,年均有效积温2 450℃,年均日照时数2 600~2 800 h,年均无霜期125 d。土壤类型为中厚层黑土,是第四纪黄土状母质上发育而来的地带性土壤,质地以黏性土为主,土壤物理性黏粒质量分数>60%,土壤膨胀性>25%,土体结构致密,渗透能力弱,毛管水运移速率较慢,土壤持水和保水能力较强,储水库容较大。地下水埋深20~30 m。

1.2 试验设计

供试土壤为典型黑土,开垦前植被为草甸草原,开垦历史约为100 a,前60 a不施肥,接下来20 a开始施用农家肥,后20 a施用化学肥料。1993年将农田分为3个肥料处理小区:CK(无肥区)、NP(化肥区,N 150 kg·hm⁻²,P₂O₅ 75 kg·hm⁻²)和NPM(化肥+有机肥区,N 150 kg·hm⁻²,P₂O₅ 75 kg·hm⁻²,有机肥3 000 kg·hm⁻²),小区面积为50.4 m²,完全随机排列,每个处理4次重复。化学肥料作为基肥在播种时施入,有机肥(腐熟猪粪)在前一年秋天翻地时施入。选取2001—2008年为研究时段,根据作物轮作制度的要求,种植玉米的年份为2000、2003、2005和2007年。将玉米的生长期划分为4个阶段,即播种—出苗、出苗—拔节、拔节—抽雄和抽雄—成熟期。

1.3 测定项目与方法

分别在玉米的拔节、吐丝和灌浆期取样测定株高和生物量,玉米成熟后进行测产。玉米样品在烘

箱内以105℃杀青30 min,然后80℃烘至恒质量后,测定植株地上生物量。

在作物生育期(5—10月),每隔5 d用CNC503DR中子仪测定1次10、20、30、40、50、70、90、110、130、150和170 cm深度土壤体积含水量。参照韩晓增等^[8]的方法,作物耗水量的计算公式为

$$T_E = P \pm \Delta W. \quad (1)$$

式(1)中, T_E 为作物耗水量,mm; P 为降水量,mm; ΔW 为观测期始、末土壤储水量的差值,mm。参照王会肖等^[9]的方法,水分利用效率的计算公式为

$$E_{WU} = Y_C / T_E. \quad (2)$$

式(2)中, E_{WU} 为水分利用效率,kg·hm⁻²·mm⁻¹; Y_C 为玉米产量,kg·hm⁻²。玉米耗水强度的计算公式为

$$R_{WC} = T_E / D. \quad (3)$$

式(3)中, R_{WC} 为耗水强度,mm·d⁻¹; T_E 为耗水量,mm; D 为生育时段,d。耗水模数的计算公式为

$$M_{WC} = 100 \times T_{E,i} / T_{E,w}. \quad (4)$$

式(4)中, M_{WC} 为耗水模数,%; $T_{E,i}$ 为玉米某一生育时期的耗水量,mm; $T_{E,w}$ 为玉米全生育期的耗水量,mm。土壤供水量的计算公式为

$$S_{SW} = W_{S,i} - W_{S,i+1}. \quad (5)$$

式(5)中, S_{SW} 为土壤供水量,mm; $W_{S,i}$ 为玉米某一生育时期的初始土壤储水量,mm; $W_{S,i+1}$ 为玉米相应生育时期末的土壤储水量,mm。

气象数据来自于中国科学院海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站内的气象观测场。

1.4 数据分析

采用SPSS 13.0软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 大气降水特征

研究区域1952—2008年大气降水的月平均值变化见图1。由图1可见,大气降水在年内呈单峰型曲线分布,即降水集中分布在作物生长季5—9月。1952—2008年平均年降水量为538.0 mm,其中87.7%发生在作物生长季。试验年份2000、2003、2005和2007年的年内降水分布与多年(1952—2008年)降水分布相似,年降水量分别为516.1、694.5、579.5和441.6 mm。根据笔者对东北黑土区降水年型的划分^[10],与多年平均降水量相比,2000和2005年为平水年,2003年为丰水年,2007年为枯水年。

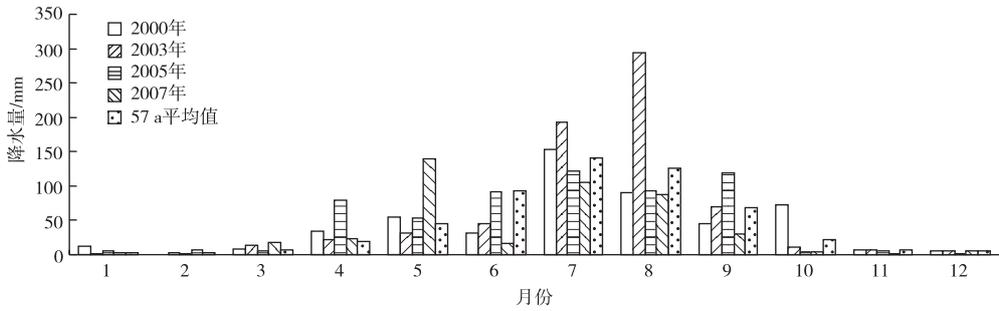


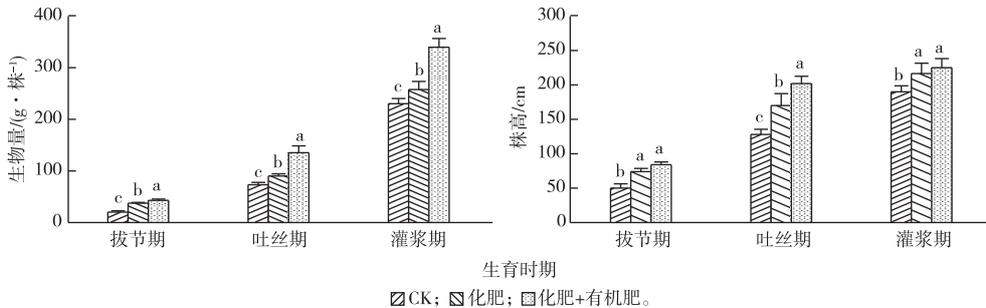
图1 研究区域 1952—2008 年大气降水的月平均值变化

Fig. 1 Distribution of precipitation in 2000, 2003, 2005 and 2007 in the study site

2.2 玉米生长与耗水特征

2.2.1 生物量

由图2可见,肥料的施用明显增加了不同生育时期玉米的生物量,与CK相比,NP和NPM处理玉米拔节期的生物量分别增加85.18%和112.74%,吐丝期分别增加23.05%和84.74%,灌浆期分别增加11.91%和45.50%。方差分析结果显示,施肥可显著增加玉米不同生育时期的生物量($P < 0.05$)。



同一幅图中同一生育时期直方柱上方英文小写字母不同表示处理间某指标差异显著($P < 0.05$)。

图2 不同施肥管理方式对玉米生物量和株高的影响

Fig. 2 Effect of fertilization management on biomass and plant height of maize

2.2.2 施肥管理对玉米耗水量的影响

经过对4a玉米耗水特征(表1)的分析,得到3个处理玉米全生育期耗水强度的4a平均值为 $3.64 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。玉米的耗水高峰出现在拔节—抽雄和抽雄—成熟期,这2个阶段玉米的平均耗水强度分别为 3.83 和 $4.10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。拔节—抽雄期是玉米生长最旺盛的时期,也是玉米小穗和小花分化的关键时期^[11],叶面积扩展迅速,同时气温明显上升,土壤蒸发和植物蒸腾都十分剧烈,平均耗水量为 126.43 mm ,平均耗水模数为 24.41% 。抽雄—成熟期是玉米产量形成的关键阶段,尤其抽雄开花期是玉米对水分最敏感的时期,该时期的土壤水分供给会影响雄穗开花传粉,水分亏缺严重会造成颗粒无收,由于此时期持续时间较长,一般在60d左右,所以耗

玉米株高表现出与生物量相似的变化趋势(图2)。与CK相比,NP和NPM处理的玉米株高在拔节期分别增加 48.00% 和 68.00% ,吐丝期分别增加 32.81% 和 57.81% ,灌浆期分别增加 13.95% 和 18.42% 。方差分析结果显示,肥料的施用显著增加了玉米株高($P < 0.05$),但是NP与NPM处理间只在生育中期(吐丝期)表现出显著差异($P < 0.05$)。

水量较多,平均为 246.06 mm ,平均耗水模数为 47.07% 。出苗—拔节期,玉米植株叶面积较小,自身的蒸腾量较低,田间土壤水分消耗以土壤蒸发为主,因此平均耗水强度最小,为 $2.70 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,平均耗水量为 86.20 mm ,平均耗水模数为 16.62% 。播种—出苗期土壤处于裸露状态,水分消耗以土壤蒸发为主,由于东北地区春季频繁出现大风,土壤蒸发强度较大,平均耗水强度为 $3.51 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,平均耗水量为 59.61 mm ,平均耗水模数为 11.88% 。

肥料的施用促进了玉米植株生长,因此也在一定程度上提高了玉米的耗水量和耗水强度。从玉米全生育期的耗水量(4a平均值)来看,与CK相比,NP和NPM处理的耗水量分别增加 2.67% 和 4.05% 。在降水较多的2003和2005年,CK、NP和

NPM 处理间耗水量差异未达显著水平,而在降水较少的 2000 和 2007 年,CK 与 NPM 处理间的耗水量差异达显著水平 ($P < 0.05$),表明在降水较少的年份施肥管理措施能够明显增加玉米生育时期的耗水量。

对玉米不同生育时期耗水量、耗水强度与该时期的降水量进行相关性分析(图 3),结果表明耗水量与降水量在 $\alpha = 0.01$ 水平上呈显著正相关,耗水强度与降水量在 $\alpha = 0.05$ 水平上呈显著正相关,说明降水量和降水的分配显著影响玉米的耗水特征。

表 1 东北黑土区玉米不同生育时期耗水特征

Table 1 Water consumption of maize at different growth stages in black soil region, Northeast China

生育时期	耗水量/mm			耗水强度/(mm · d ⁻¹)			耗水模数/%		
	CK	NP	NPM	CK	NP	NPM	CK	NP	NPM
2000 年									
播种一出苗	63.79 ± 0.77 ^b	66.65 ± 0.62 ^a	67.00 ± 1.23 ^a	3.75 ± 0.05 ^b	3.92 ± 0.04 ^a	3.94 ± 0.07 ^a	13.64	14.02	13.86
出苗一拔节	17.88 ± 0.85 ^a	19.18 ± 0.26 ^a	19.70 ± 1.41 ^a	0.56 ± 0.03 ^a	0.60 ± 0.01 ^a	0.62 ± 0.04 ^a	3.82	4.03	4.08
拔节一抽雄	140.55 ± 0.89 ^a	140.07 ± 2.63 ^a	141.15 ± 2.97 ^a	4.26 ± 0.03 ^a	4.24 ± 0.08 ^a	4.28 ± 0.09 ^a	30.06	29.46	29.20
抽雄一成熟	245.29 ± 2.59 ^b	249.63 ± 2.60 ^{ab}	255.51 ± 5.69 ^a	4.09 ± 0.04 ^b	4.16 ± 0.04 ^{ab}	4.26 ± 0.10 ^a	52.47	52.50	52.86
全生育期	467.51 ± 4.88 ^b	475.53 ± 4.38 ^{ab}	483.36 ± 3.07 ^a	3.29 ± 0.03 ^b	3.35 ± 0.03 ^{ab}	3.40 ± 0.02 ^a			
2003 年									
播种一出苗	43.55 ± 2.79 ^b	37.62 ± 2.96 ^c	50.98 ± 2.84 ^a	2.56 ± 0.16 ^b	2.21 ± 0.17 ^c	3.00 ± 0.17 ^a	7.55	6.45	8.70
出苗一拔节	65.03 ± 1.89 ^a	62.69 ± 2.23 ^a	64.16 ± 2.11 ^a	2.03 ± 0.06 ^a	1.96 ± 0.07 ^a	2.01 ± 0.07 ^a	11.27	10.75	10.95
拔节一抽雄	141.16 ± 2.03 ^b	147.91 ± 2.44 ^a	142.46 ± 2.95 ^b	4.28 ± 0.06 ^b	4.48 ± 0.07 ^a	4.32 ± 0.09 ^b	24.46	25.36	24.32
抽雄一成熟	327.31 ± 2.41 ^a	335.12 ± 5.50 ^a	335.13 ± 8.90 ^a	5.46 ± 0.04 ^a	5.59 ± 0.10 ^a	5.59 ± 0.15 ^a	56.72	57.45	57.21
全生育期	577.05 ± 21.15 ^a	583.34 ± 14.57 ^a	585.74 ± 5.44 ^a	4.06 ± 0.15 ^a	4.11 ± 0.10 ^a	4.12 ± 0.04 ^a			
2005 年									
播种一出苗	52.48 ± 2.15 ^a	54.82 ± 2.18 ^a	44.21 ± 2.02 ^b	3.09 ± 0.13 ^a	3.22 ± 0.13 ^a	2.60 ± 0.12 ^b	10.50	10.85	8.67
出苗一拔节	117.45 ± 1.95 ^a	115.71 ± 2.19 ^a	119.43 ± 1.70 ^a	3.67 ± 0.06 ^a	3.62 ± 0.07 ^a	3.73 ± 0.05 ^a	23.49	22.91	23.42
拔节一抽雄	96.26 ± 1.91 ^b	87.65 ± 3.52 ^c	105.85 ± 3.10 ^a	2.92 ± 0.06 ^b	2.66 ± 0.11 ^c	3.21 ± 0.90 ^a	19.25	17.35	20.75
抽雄一成熟	233.80 ± 4.99 ^b	246.92 ± 3.11 ^a	251.50 ± 4.87 ^a	3.90 ± 0.08 ^b	4.12 ± 0.05 ^a	4.19 ± 0.08 ^a	46.76	48.89	49.31
全生育期	500.00 ± 8.46 ^a	505.10 ± 4.96 ^a	510.00 ± 5.56 ^a	3.52 ± 0.06 ^a	3.56 ± 0.04 ^a	3.59 ± 0.04 ^a			
2007 年									
播种一出苗	79.21 ± 3.70 ^a	78.84 ± 5.63 ^a	76.22 ± 5.65 ^a	4.66 ± 0.22 ^a	4.63 ± 0.33 ^a	4.48 ± 0.33 ^a	16.59	15.40	14.53
出苗一拔节	135.57 ± 4.98 ^b	146.93 ± 3.02 ^a	150.62 ± 4.29 ^a	4.24 ± 0.16 ^b	4.59 ± 0.09 ^a	4.71 ± 0.13 ^a	28.40	28.70	28.70
拔节一抽雄	114.82 ± 2.55 ^c	126.06 ± 2.79 ^b	133.25 ± 3.70 ^a	3.48 ± 0.08 ^c	3.82 ± 0.08 ^b	4.04 ± 0.11 ^a	24.05	24.62	25.39
抽雄一成熟	147.75 ± 3.39 ^b	160.10 ± 3.98 ^a	164.65 ± 6.86 ^a	2.46 ± 0.06 ^b	2.67 ± 0.07 ^a	2.74 ± 0.12 ^a	30.95	31.27	31.38
全生育期	477.36 ± 6.36 ^c	511.93 ± 4.94 ^b	524.74 ± 5.44 ^a	3.36 ± 0.04 ^c	3.60 ± 0.03 ^b	3.70 ± 0.04 ^a			

CK 为不施肥;NP 为化肥;NPM 为化肥 + 有机肥。同一指标同一行英文小写字母不同表示处理间某指标差异显著 ($P < 0.05$)。

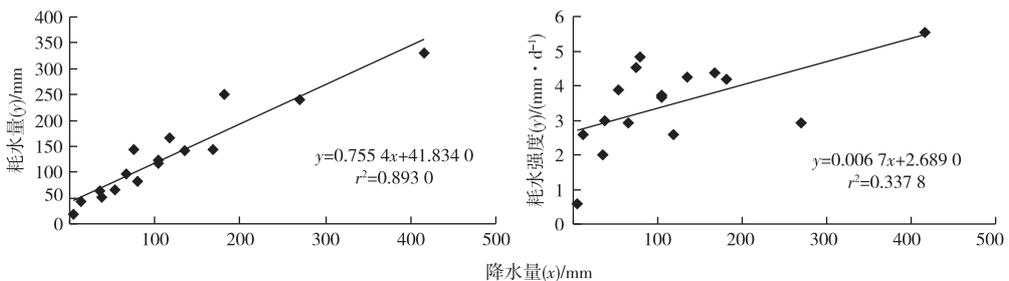


图 3 玉米各生育时期耗水量、耗水强度与降水量的相关性分析

Fig.3 Relationships of water consumption rate and water consumption intensity of maize with rainfall at different growing stages

2.3 土壤供水特征分析

在无灌溉的情况下,东北黑土区玉米耗水的主要来源是生育期内的大气降水和土壤供水^[12-13]。由表 2 可知,在丰水年(2003 年),虽然全生育期降

水量为 631.4 mm,但仅有 47.3 mm 的降水发生在播种一拔节期,远不能满足该阶段玉米生长的水分需求。就 3 个处理平均而言,在播种一出苗期土壤供水占耗水量的 71.88%,出苗一拔节期占

45.11%。拔节期后随着雨季的来临,降水能够满足玉米对水分的需求,盈余的降水会贮存在土壤中供下一季作物利用。

在降水量中等的2005年,全生育期降水量为478.0 mm,但50%以上的降水(270.4 mm)发生在抽雄期以后,导致玉米生长前期水分不足。就3个处理平均而言,播种一出苗、出苗一拔节和拔节一抽雄期土壤含水量占耗水量的比例分别为26.30%、10.90%和31.26%,全生育期土壤水分被消耗27.03 mm。2000和2007年降水偏少,仅2007年播种一出苗期降水量能够满足玉米耗水需求。

生长季内降水变异较大,导致玉米生育前期降水缺乏,在观测的4 a内播种一拔节阶段降水平均缺乏量(玉米耗水量与降水量的差值)为22.53

mm,在拔节一抽雄阶段降水平均缺乏量为8.03 mm,而在抽雄以后降水相对集中,土壤水分开始出现盈余。

在干旱年份肥料的施用,特别是有机肥的施用能够通过促进作物对土壤水分的吸收利用来缓解干旱的胁迫^[14]。该研究中肥料施用对土壤供水量的影响表现为在降水较少的年份和降水相对较少的生育时期能显著增加玉米对土壤水分的消耗,在一定程度上缓解降水供给不足的矛盾。如在2000年的抽雄一成熟期,土壤平均供水量为67.64 mm,与CK相比,NP和NPM处理多消耗6.91%和16.28%的土壤水分;在降水较少的2007年,出苗一成熟阶段施肥处理和不施肥对照间土壤含水量差异均达显著水平($P < 0.05$)。

表2 不同施肥管理下黑土区种植玉米土壤供水特征

Table 2 Characteristics of soil water supply in maize fields under different fertilization managements

生育时期	降水量/ mm	土壤含水量/mm			土壤含水量占耗水量的比例/%		
		CK	NP	NPM	CK	NP	NPM
2000年							
播种一出苗	53.6	10.19±1.18 ^a	13.05±0.51 ^b	13.40±0.61 ^b	15.97	19.58	20.00
出苗一拔节	4.9	12.98±1.77 ^a	14.27±0.33 ^a	14.80±0.72 ^a	72.60	74.40	75.13
拔节一抽雄	134.6	5.95±0.61 ^a	5.47±0.56 ^a	6.55±0.58 ^a	4.23	3.91	4.64
抽雄一成熟	182.5	62.79±3.62 ^a	67.13±2.71 ^{ab}	73.01±4.17 ^b	25.60	26.89	28.57
全生育期	375.6	91.91±2.83 ^a	99.93±2.40 ^b	107.76±2.48 ^c	19.66	21.01	22.29
2003年							
播种一出苗	12.2	31.35±2.16 ^b	25.42±2.14 ^a	38.78±3.24 ^c	71.99	67.57	76.07
出苗一拔节	35.1	29.93±3.18 ^a	27.59±2.15 ^a	29.06±2.60 ^a	46.02	44.01	45.29
拔节一抽雄	168.1	-26.94±2.75 ^a	-20.19±2.45 ^b	-25.64±2.02 ^a			
抽雄一成熟	416.0	-88.69±3.32 ^a	-80.88±2.88 ^b	-80.87±4.82 ^b			
全生育期	631.4	-54.35±3.74 ^a	-48.06±2.25 ^a	-45.66±1.38 ^b			
2005年							
播种一出苗	36.9	15.57±2.92 ^b	17.92±1.39 ^b	7.31±1.41 ^a	29.67	32.69	16.53
出苗一拔节	104.7	12.75±2.48 ^a	11.01±2.80 ^a	14.73±2.53 ^a	10.86	9.52	12.33
拔节一抽雄	66.0	30.26±2.23 ^a	21.64±7.38 ^a	39.85±2.48 ^b	31.44	24.69	37.65
抽雄一成熟	270.4	-36.60±3.79 ^a	-23.48±3.40 ^b	-18.90±3.60 ^b			
全生育期	478.0	22.00±3.61 ^a	27.10±2.12 ^{ab}	32.00±3.44 ^b	4.40	5.37	6.27
2007年							
播种一出苗	80.1	-0.89±2.74 ^a	-1.62±2.31 ^b	-3.88±2.31 ^a			
出苗一拔节	75.5	60.07±3.25 ^a	71.43±1.96 ^b	75.12±1.89 ^b	44.31	48.61	49.87
拔节一抽雄	104.9	9.92±2.22 ^a	21.16±2.49 ^b	28.35±2.38 ^c	8.64	16.79	21.28
抽雄一成熟	118.1	29.65±3.94 ^a	42.00±4.67 ^b	46.55±3.97 ^b	20.07	23.23	28.27
全生育期	378.6	98.75±6.89 ^a	132.97±4.83 ^a	146.14±5.83 ^b	20.69	25.97	27.85

CK为不施肥;NP为化肥;NPM为化肥+有机肥。同一行英文小写字母不同表示处理间土壤含水量差异显著($P < 0.05$)。土壤含水量为负值表示降水盈余。

2.4 玉米的水分利用效率

从图4可以看出,玉米的水分利用效率因降水年型和施肥管理方式而异。各处理间比较而言,CK水分利用效率最低。与CK相比,NP和NPM处理玉米的平均水分利用效率分别增加28.92%和

36.68%,说明肥料的施用导致玉米的水分利用效率显著增加($P < 0.05$)。对于不同的降水年型来说,平水年和枯水年玉米的水分利用效率显著高于丰水年($P < 0.05$),如2007年各处理水分利用效率的平均值比2003年高23.17%。

相关性分析表明,玉米产量与水分利用效率间呈显著线性正相关($r = 0.81, P < 0.05$),即随着玉米水分利用效率的增加,产量也随之增加。

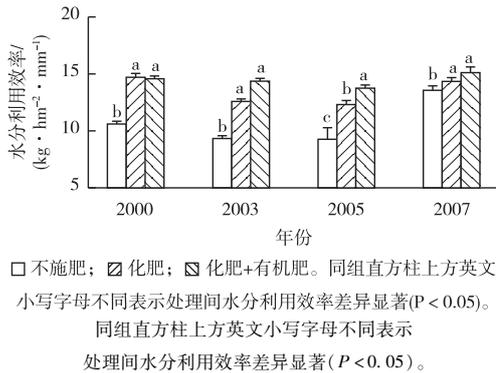


图4 不同施肥管理方式对玉米水分利用效率的影响

Fig. 4 Effect of fertilization management on water use efficiency of maize

3 结论

(1) 经过对研究区 2000、2003、2005 和 2007 年玉米不同生育时期耗水特征的分析,得到在东北黑土区玉米全生育期的平均耗水强度为 $3.64 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,耗水高峰出现在拔节—抽雄和抽雄—成熟期,这 2 个阶段的耗水模数分别为 24.41% 和 47.07%。年降水量和降水分布显著影响作物的耗水量和耗水强度。

(2) 东北黑土区作物生育期内的耗水主要来自生长季内的大气降水和土壤供水,土壤供水对于缓解干旱年份或某一干旱时期的降水不足具有重要意义。笔者观测的 4 a 中,降水不足主要出现在玉米播种—拔节期,其次是拔节—抽雄期。不同施肥管理方式在降水较少的年份或者降水相对较少的生育时段均能明显增加玉米对土壤水分的消耗,其中以化肥和有机肥配施效应更明显。肥料的施用能够增加玉米的水分利用效率。

参考文献:

- [1] 韩贵清,杨林章. 东北黑土资源利用现状及发展战略[M]. 北京:中国大地出版社,2009:1-30.
- [2] 陈怀亮,张雪芬. 玉米生产农业气象服务指南[M]. 北京:气象出版社,1999:30-61.
- [3] 王静,杨晓光,李勇,等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化VI:黑龙江省三江平原地区降水资源变化特征及其对春玉米生产的可能影响[J]. 应用生态学报,2011,22(6):1511-1522.
- [4] 孟凯,张兴义,隋跃宇,等. 黑龙江海伦农田黑土水分特征[J]. 土壤通报,2003,34(1):11-14.
- [5] 孟凯,王德禄. 中国水问题研究:北方黑土区土壤水分特征及有效性研究[M]. 北京:气象出版社,1996:198-202.
- [6] 张迪,韩晓增,宋春,等. 不同植被覆盖与施肥管理对黑土活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 生态与农村环境学报,2008,24(4):1-5.
- [7] 邹文秀,韩晓增,王守宇,等. 干旱条件下黑土农田水分特征研究[J]. 中国生态农业学报,2009,17(4):677-680.
- [8] 韩晓增,王守宇,宋春雨,等. 海伦地区黑土农田土壤水分动态平衡特征研究[J]. 农业系统科学与综合研究,2003,19(4):252-255.
- [9] 王会肖,刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展[J]. 水科学研究进展,2000,11(1):110-115.
- [10] 邹文秀,韩晓增,江恒,等. 东北黑土区大气降水特征及其对土壤水分的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(9):196-202.
- [11] 宋凤斌. 玉米非生物逆境生理生态[M]. 北京:科学出版社,2005:1-7.
- [12] 孟凯,张兴义,隋跃宇,等. 黑土农田水肥条件对作物产量及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报,2000,13(2):199-212.
- [13] 孟凯,张兴义. 东北北部黑土区玉米耗水特征的分析[J]. 玉米科学,1996,4(3):66-67.
- [14] 邹文秀,韩晓增,王守宇,等. 干旱条件下黑土农田水分特征研究[J]. 中国农业生态学报,2009,17(4):677-680.

作者简介:邹文秀(1982—),黑龙江巴彦人,女,助理研究员,主要从事农田土壤水分方面的研究。E-mail: zouwenxiu@hotmail.com