

河套灌区节水减肥对玉米不同生育期水分和养分的影响

戴嘉璐¹, 李瑞平¹, 李聪聪¹, 鲁耀泽², 邹存菁³

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018;2.巴彦淖尔市水利科学研究所,
内蒙古 巴彦淖尔 015000;3.内蒙古河套灌区永济灌域管理局,内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘要:为探究不同灌水和施肥条件对河套灌区不同生育期玉米生长的影响,以玉米“金丰 628”为材料,分别研究了低水(1 800 m³/hm²)、中水(2 250 m³/hm²)、高水(2 700 m³/hm²)3 个灌水水平,低肥(300 kg/hm²)、中肥(375 kg/hm²)、高肥(450 kg/hm²)3 个施肥水平,并以当地一般灌水量和施肥量为对照(CK),共 10 个处理在苗期、拔节、抽雄、灌浆、成熟期对土壤水分、养分和玉米生长的影响。结果表明:拔节期以后,土壤平均含水率呈下降趋势;抽雄和灌浆期玉米耗水量最大,占整个生育期耗水量 65%以上;拔节期土壤硝态氮积累量最小,植物吸收大量养分供玉米快速生长;高水水平下,玉米产量及水分利用效率随灌水和施肥量的增加呈先增后减趋势。通过多元逐步回归分析不同生育阶段土壤水分和养分对玉米生长的影响,筛选出不同生育期对玉米生长影响更为关键的要素,得出在抽雄、灌浆、成熟期土壤水分对玉米生长的影响比土壤养分大,拔节期土壤养分对玉米生长的影响比土壤水分大。研究结果可为河套灌区节水减肥,合理分配水资源,减少氮素面源污染,保障玉米稳定生长提供理论基础。

关键词: 土壤水分; 土壤养分; 生育期; 逐步回归

中图分类号:S275.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)01-0271-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.01.039

Effects of Water Saving and Fertilizer Reducing on Water and Nutrients of Maize at Different Growth Stages in the Hetao Irrigated Area

DAI Jialu¹, LI Ruiping¹, LI Congcong¹, LU Yaoze², ZOU Cunjing³

(1.School of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University,

Hohhot 010018;2.Bayannur Water Conservancy Research Institute Bayannur, Inner Mongolia 015000;

3.Yongji Irrigation Area Administration of Hetao Irrigation District, Bayannur, Inner Mongolia 015000)

Abstract: In order to investigate the effects of different irrigation and fertilization conditions on the growth of maize at different fertility stages in the Loop irrigation area, three irrigation levels of low water (1 800 m³/hm²), medium water (2 250 m³/hm²) and high water (2 700 m³/hm²), and three fertilization levels of low (300 kg/hm²), medium (375 kg/hm²) and high (450 kg/hm²) fertilization were investigated using maize “Jinping628” as the material, respectively. At the same time, the local irrigation and fertilization amount were used as the control group (CK). The effects of 10 treatments on soil moisture, nutrient and maize growth in the seedling stage, jointing stage, tasseling stage, filling stage and maturity stage were analyzed. Based on the results, it was found that the average soil water content tended to decrease after the pulling stage. Maize water consumption was highest during the pulling and filling stages, accounting for more than 65% of water consumption during the entire reproductive period. Soil nitrate-nitrogen accumulation was minimal during the pull-out stage, and plants absorbed large amounts of nutrients for rapid maize growth. Under high water levels, maize yield and water-use efficiency tended to increase and then decrease with irrigation and fertilization. Through multiple stepwise regression analysis, the effects of soil moisture and nutrients on maize growth in different growth stages were screened out. The results showed that soil moisture had a greater influence on maize growth than soil nutrients at tasseling, filling and maturity stages, and soil nutrients at jointing

收稿日期:2020-06-15

资助项目:国家自然科学基金项目(51839006)

第一作者:戴嘉璐(1996—),女,硕士研究生,主要从事灌溉排水理论与新技术研究。E-mail:1529231858@qq.com

通信作者:李瑞平(1973—),男,博士,教授,主要从事节水灌溉与农业水利遥感信息技术研究。E-mail:nmgrrp@163.com

stage had a greater impact on maize growth than soil moisture. The results of the study can provide a theoretical basis for water conservation and reduction of chemical fertilizer use in the loop irrigation area, rational allocation of water resources, reduction of nitrogen surface pollution, and ensuring stable growth of maize.

Keywords: soil moisture; soil nutrients; growth stages; stepwise regression

内蒙古河套灌区地处我国干旱的西北平原,是国家和自治区重要的商品粮油生产基地。水、肥是该地区农业发展过程中的 2 大限制因子,但长期不合理的灌溉方式和施肥习惯造成了资源的浪费和生态环境的恶化^[1-3]。正确的水肥规划,有利于保证作物的需水量和养分吸收,并对农田环境有所改善和保证作物稳产。徐昭等^[4]通过对灌水量和施肥量限制,改变了盐渍化农田水土环境,进而影响玉米产量。邓西平等^[5]研究表明,充分灌水下可使作物产量及水分生产效率得以同步提高。郭富强等^[6]通过对比常规灌溉施氮处理和优化灌溉施氮处理对作物产量的影响,得出在节水节氮 20% 后,作物产量得以提高,表明河套灌区节水节氮仍有一定空间。白向历等^[7]通过研究不同生育期水分胁迫对玉米产量及生长发育的影响,得出抽雄期为玉米的重要需水期,此时缺水将会导致玉米穗粒数大幅下降,产量明显降低。冯乐勇等^[8]研究表明,玉米籽粒灌浆期耗水量最大,土壤含水量相对其他时期较低。宁东峰等^[9]指出,随施氮量增加,土壤硝态氮含量显著增加,低水灌溉条件下,土壤吸氮量降低,土壤中硝态氮累积量增加。李成等^[10]研究表明,在适宜的水分条件下可以促进作物对氮的利

用率,有利于作物生长发育及最终产量的形成。

由于河套灌区水资源短缺,明确作物耗水特性和养分利用成为制定灌溉施肥制度的重要前提。本文通过设置不同的水肥组合,主要研究不同生育期土壤水分消耗和养分吸收,并运用多元逐步回归分析节水减肥对河套灌区玉米不同生育期生长的影响,明确节水减肥下影响玉米不同生育期生长的关键要素,为干旱半干旱地区合理分配水资源,减少氮素面源污染,保障玉米稳定生长提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验时间为 2019 年 4—9 月,地点位于内蒙古自治区巴彦淖尔市临河区曙光试验站(40°43′26″N, 107°13′23″E),属于干旱半干旱气候。试验区多年平均降水量为 144.2 mm,年平均蒸发量为 2 434.7 mm,年平均日照时间 3 180 h。土壤质地主要为沙壤土,耕层平均土壤容重为 1.45 g/cm³,盐分 1.2 g/kg,有机质含量 10.80 g/kg,全氮含量 0.244 g/kg,全磷含量 0.338 g/kg。玉米是该地区的主要粮食作物。试验区土壤及气象条件见表 1 和图 1。

表 1 试验区土壤条件

土层 深度/cm	颗粒分布/%			土壤容重/ (g·cm ⁻³)	田间 持水率/%	饱和 含水率/%	土壤 类型
	黏粒 (<0.002)	粉粒 (0.05~0.002)	砂粒 (5~0.05)				
0—20	19.78	69.02	11.20	1.45	17.49	35.47	粉砂壤土
20—40	6.32	80.85	12.83	1.40	20.52	34.82	粉砂土
40—60	22.80	50.80	26.40	1.41	25.18	34.76	粉砂壤土
60—80	12.93	80.09	6.98	1.51	22.57	27.77	粉砂壤土
80—100	10.28	87.00	2.72	1.50	20.28	22.99	粉砂土

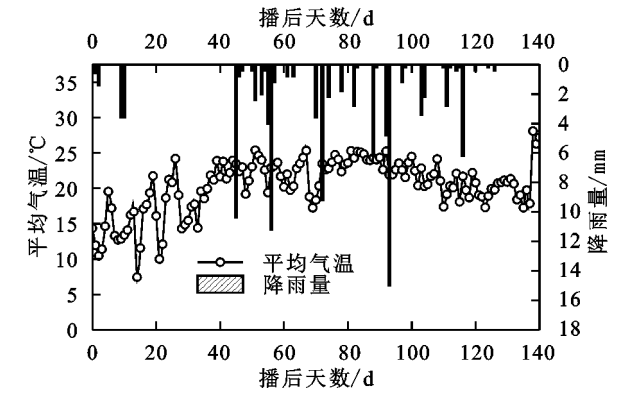


图 1 试验区气象条件

1.2 试验设计

试验设置灌水量和施肥量 2 个试验要素,每个要

素 3 个水平。灌水水平分别为比当地一般灌水量(3 375 m³/hm²)减少 46.7%,33.3%,20.0%的低水(1 800 m³/hm²)、中水(2 250 m³/hm²)、高水(2 700 m³/hm²),施肥水平分别为比当地施肥量(600 kg/hm²)减少 50.0%,37.5%,25.0%的低肥(300 kg/hm²)、中肥(375 kg/hm²)、高肥(450 kg/hm²),将当地灌水量(3 375 m³/hm²)和施肥量(600 kg/hm²)设为 CK。共 10 个处理,每个处理 3 次重复。各处理底肥施用 300 kg/hm² 磷酸二铵,播种时由播种机代入,与当地农民相同;抽雄期追肥,追肥施用尿素,含氮 46.8%。具体试验设计见表 2。为了避免边行效应,试验小区东西两侧各设 1 m 宽、南北两侧各设 2 m

宽的保护带,保护带高为 15 cm,以防止地面灌溉串水和小区间地下侧向渗漏。

玉米供试品种为“金萃 628”,种植密度为行距 40 cm,株距 30 cm。2019 年 4 月 29 日播种,9 月 25 日成熟。灌水方式为地面灌溉,采用水泵、水表定量控制,分别在拔节期(6 月 17 日)、抽雄期(7 月 12 日)、灌浆期(8 月 5 日)灌溉。CK 灌水与施肥时间与各处理相同。对各处理采用相同的田间管理:人工除草及病虫害防治。

表 2 试验设计方案

处理	灌水定额/(m ³ ·hm ⁻²)			施肥量/ (kg·hm ⁻²)
	第 1 次灌水	第 2 次灌水	第 3 次灌水	追肥
Y1	600	600	600	300
Y2	600	600	600	375
Y3	600	600	600	450
Y4	750	750	750	300
Y5	750	750	750	375
Y6	750	750	750	450
Y7	900	900	900	300
Y8	900	900	900	375
Y9	900	900	900	450
CK	1125	1125	1125	600

1.3 观测指标与方法

1.3.1 土壤含水率 采用烘干法测定:用土钻在试验区进行取样,取样深度分别为 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm,共 5 层;每 14 天测定 1 次,播前、收获、降雨以及灌水前后加测 1 次。土壤 0—100 cm 土层剖面内的平均含水率采用加权平均法计算。

1.3.2 土壤硝态氮 每次取土后的土样采用紫外分光光度法测定土壤的硝态氮。土壤 0—100 cm 土层剖面内的平均硝态氮含量采用加权平均法计算。

1.3.3 生理性状及产量 株高、叶面积、茎粗分别在玉米出苗、拔节、抽雄、灌浆、成熟期测量。玉米收获时每个小区选取能够代表玉米平均长势的 5 株成熟玉米,果穗风干后经人工脱粒,75℃烘至恒重后测其产量。

1.3.4 采用水量平衡法计算玉米各生育期耗水量 ET

$$ET=\Delta W+P+I+G-R-F$$
 (1)

式中:ΔW 为土壤储水量之差(mm);P 为生育期有效降雨量(mm),如果降雨量小于当日参考蒸发蒸腾量的 0.2 倍,则视为无效降雨;I 为玉米生育期的灌水量(mm);G 为生育期地下水对作物根系的补水量(mm),详细计算过程参考文献[11];R 为生育期地表径流量(mm),试验区地表平坦,无地表径流产生;F 为生育期根区深层渗漏量(mm),假定降雨或灌溉先补给根土层土壤水分至田间持水量,多余的水分即为深层渗漏损失量[12],具体计算方法为灌水(或降水)前 100 cm 土层内有效土壤含水率和灌水量(或降水)相加,再减去田间持水量。

玉米水分利用效率(WUE,kg/(hm²·mm))计算公式为:

$$WUE=Y/ET$$
 (2)

式中:Y 为单位面积玉米产量(kg/hm²)。

1.3.5 硝态氮累积量(kg/hm²)=土层厚度(cm)×土壤容重(g/cm³)×土壤硝态氮含量(mg/kg)/10^[13]。

1.4 数据分析

利用 Excel 2007 进行数据整理,SPSS 23 进行相关性分析和逐步回归分析,采用 LSD 进行显著性检验,Origin 2018 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同水肥处理对土壤含水率的影响

由图 2 可知,全生育期内,各处理平均土壤含水率变化趋势大体一致,拔节期以后土壤含水率呈下降趋势。苗期—拔节期各灌水处理间含水率相差较大,CK 土壤含水率较低水、中水和高水处理分别高 49.8%,32.2%,22.0%。拔节—抽雄期 CK 土壤含水率较低水、中水和高水处理分别高 39.9%,22.3%,14.0%。抽雄—灌浆期 CK 土壤含水率较低水、中水和高水处理分别高 35.5%,21.5%,13.8%。灌浆—成熟期 CK 土壤含水率较低水、中水和高水处理分别高 34.5%,20.1%,12.3%。随生育期推进,各处理土壤含水率差异逐渐减小。

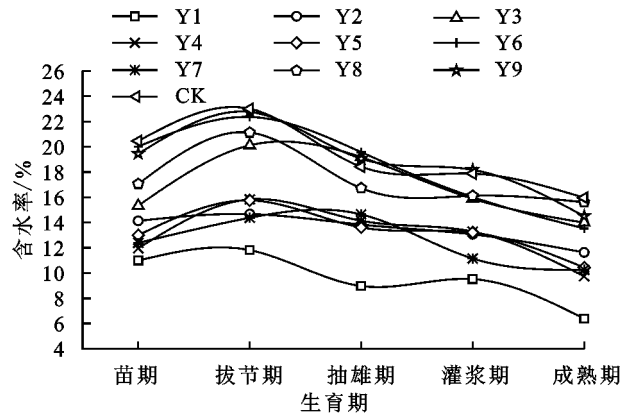


图 2 各处理 0—100 cm 土层各生育期平均含水率变化

2.2 不同水肥处理下玉米各生育期耗水变化

由图 3 可知,全生育期内玉米耗水呈逐渐增加的趋势,苗期—抽雄期玉米耗水量增速较大,之后玉米耗水量增速变缓。各生育期 CK 耗水量均为最大值,苗期低水、中水、高水处理下平均耗水量较 CK 分别降低 20.0%,11.9%,4.3%;拔节期低水、中水、高水处理下平均耗水量较 CK 分别降低 44.1%,36.6%,27.7%;抽雄期低水、中水、高水处理下平均耗水量较 CK 分别降低 42.2%,31.3%,23.3%;灌浆期低水、中水、高水处理下平均耗水量较 CK 分别降低 34.3%,26.1%,19.7%。

从表 3 各处理下不同生育期玉米耗水模数中可以看出,苗期耗水模数较低,拔节、抽雄、灌浆期耗水

模数较高,其中抽雄和灌浆期的耗水模数占玉米全生育期的 65%以上。说明玉米在抽雄和灌浆期生长速度快,叶面蒸腾速率大,耗水量也大。

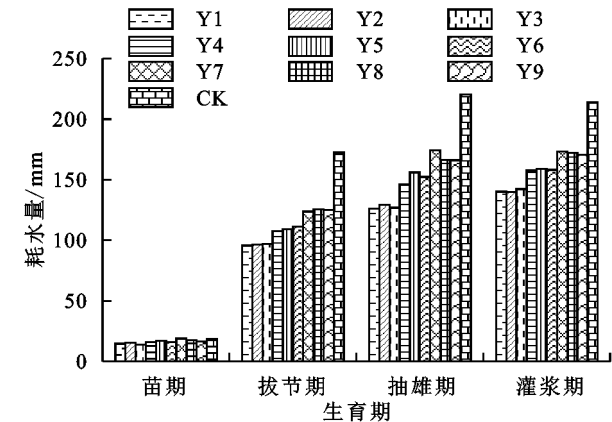


图 3 各处理不同生育期玉米耗水变化

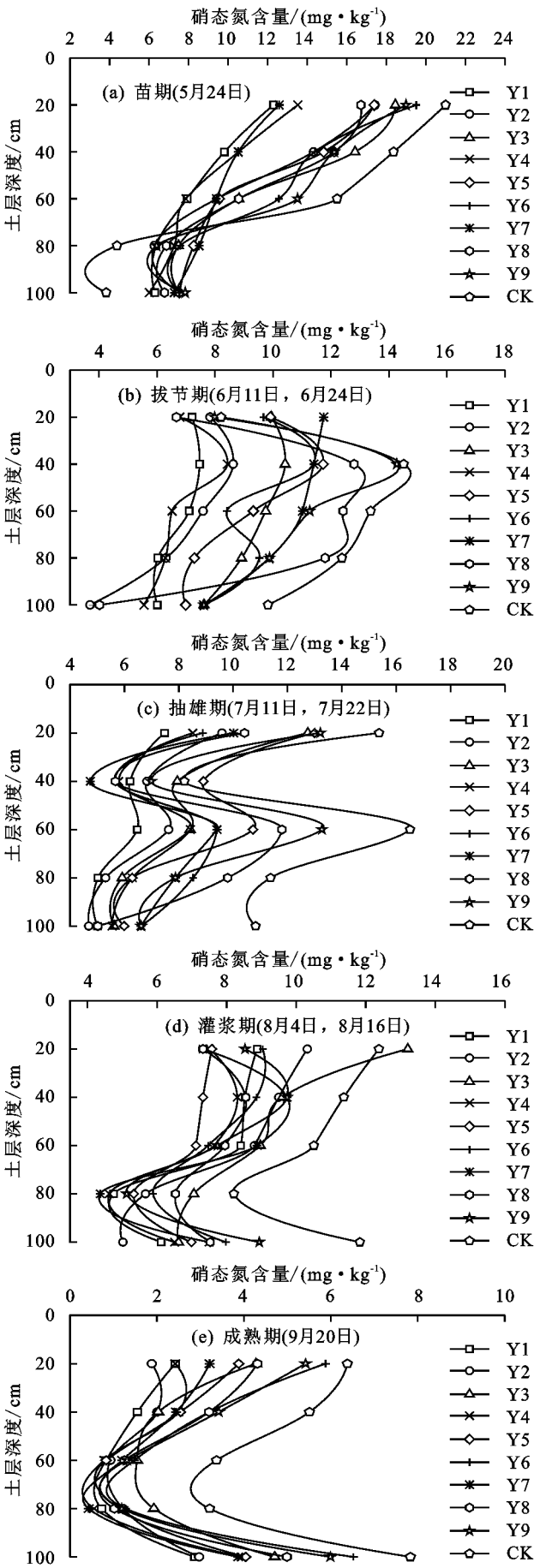
表 3 各处理不同生育期玉米耗水模数

处理	单位: %			
	苗期	拔节期	抽雄期	灌浆期
Y1	3.91	25.40	33.49	37.20
Y2	4.11	25.33	33.88	36.68
Y3	3.67	25.55	33.39	37.40
Y4	3.72	25.17	34.21	36.89
Y5	3.85	24.76	35.37	36.02
Y6	3.65	25.43	34.78	36.14
Y7	3.87	25.24	35.55	35.34
Y8	3.66	26.05	34.56	35.74
Y9	3.45	26.15	34.75	35.65
CK	2.95	27.57	35.24	34.23

注:苗期从4月30日至6月9日;拔节期从6月10日至7月8日;抽雄期从7月9日至7月31日;灌浆期从8月1日至8月28日。

2.3 不同水肥处理下各生育期土壤养分变化

2.3.1 不同水肥处理对土壤硝态氮含量的影响 由图 4 可知,苗期土壤硝态氮含量主要集中于土壤表层,各处理间硝态氮含量变化差异较小。拔节期由于玉米处于快速生长阶段,表层土壤硝态氮含量降低,各处理硝态氮含量峰值由表层下移到 40 cm 处左右,最大含量也从 12.3~21 mg/kg 降低到 7.4~14.5 mg/kg,从而证实了此阶段玉米生长对养分的大量需求。抽雄期各处理土壤硝态氮含量峰值下移到 60 cm 左右,不同灌水处理间硝态氮含量差异不大,不同施肥处理间土壤硝态氮含量表现为 CK>高肥>中肥>低肥。灌浆期各处理土壤硝态氮含量较抽雄期呈下降趋势,低水处理下硝态氮含量大于高水处理,说明水分不足时不利于玉米养分吸收。成熟期各处理硝态氮含量峰值继续下移,土壤硝态氮含量聚集于 100 cm 左右,相同灌水条件下,土壤硝态氮含量表现为高肥>中肥>低肥,说明高肥条件下通过生育期的灌水,氮的垂直迁移量也相对较大。



注:拔节、抽雄、灌浆期土壤硝态氮含量取 2 次测定平均值。

图 4 土壤硝态氮含量变化

2.3.2 不同水肥处理对土壤硝态氮累积量的影响

由图 5 可知,全生育期内,各水肥处理下土壤硝态氮累积量变化趋势一致。各水肥处理在苗期累积量最高,占总累积量的 25.5%~29.6%。拔节期各水肥处理的累积量明显降低,占总累积量的 6.9%~12.3%。从抽雄期到成熟期,各处理的累积量逐渐降低,抽雄期各处理累积量占总累积量的 21.9%~24.1%、灌浆期各处理累积量占总累积量的 20.5%~23.5%、成熟期各处理累积量占总累积量的 16.0%~19.2%。原因是抽雄期以后,玉米进入生殖生长阶段,主要进行的是氮素内部的转移,从外界吸收的氮素减少。全生育期 CK 土壤硝态氮累积量较低肥、中肥、高肥处理分别高 65.7%,30.8%,23.2%。

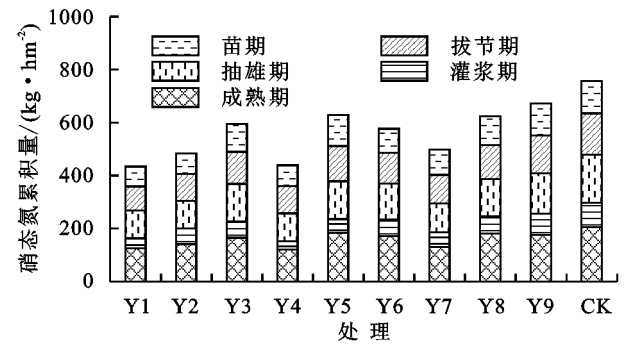


图 5 各处理不同生育期 0—100 cm 土层平均硝态氮累积量变化

2.4 不同水肥处理对玉米生理性状、产量及水分利用效率的影响

由图 6 可知,在玉米的整个生育期内不同水肥处理下株高、叶面积指数、茎粗的变化趋势基本一致,抽雄期各指标达到最大值,抽雄期以后变化逐渐平缓。CK 各生育期玉米生理性状指标较大,平均株高较低水、中水、高水、低肥、中肥、高肥处理分别高 21.4%,9.2%,4.4%,16.3%,10.7%,7.1%;平均茎粗较低水、中水、高水、低肥、中肥、高肥处理分别高 10.0%,4.6%,0.2%,6.4%,3.8%,4.2%;平均叶面积指数较低水、中水、高水、低肥、中肥、高肥处理分别高 21.3%,2.9%,3.2%,14.3%,6.1%,5.6%。

临河区多年平均产量在 12 226.65~13 307.85 kg/hm²。各处理的玉米产量及水分利用效率见表 4。结果表明,高灌水水平的各处理产量与 CK 无显著性差异且均位于平均产量区间,其他灌水处理较 CK 产量显著降低($P<0.05$)。相同灌水水平下耗水量无显著差异,高水水平下耗水量显著高于中水和低水水平。高水水平下,中肥和高肥处理的水分利用效率显著高于低肥处理,中水水平下,各施肥处理的水分利用效率差异显著,低水水平下,中肥和高肥处理的水分利用效率显著高于低肥处理。CK 水分利用

效率较低且与 Y8、Y9 处理无显著性差异,Y8、Y9 水分利用效率较 CK 分别提高 22.2%,17.8%。

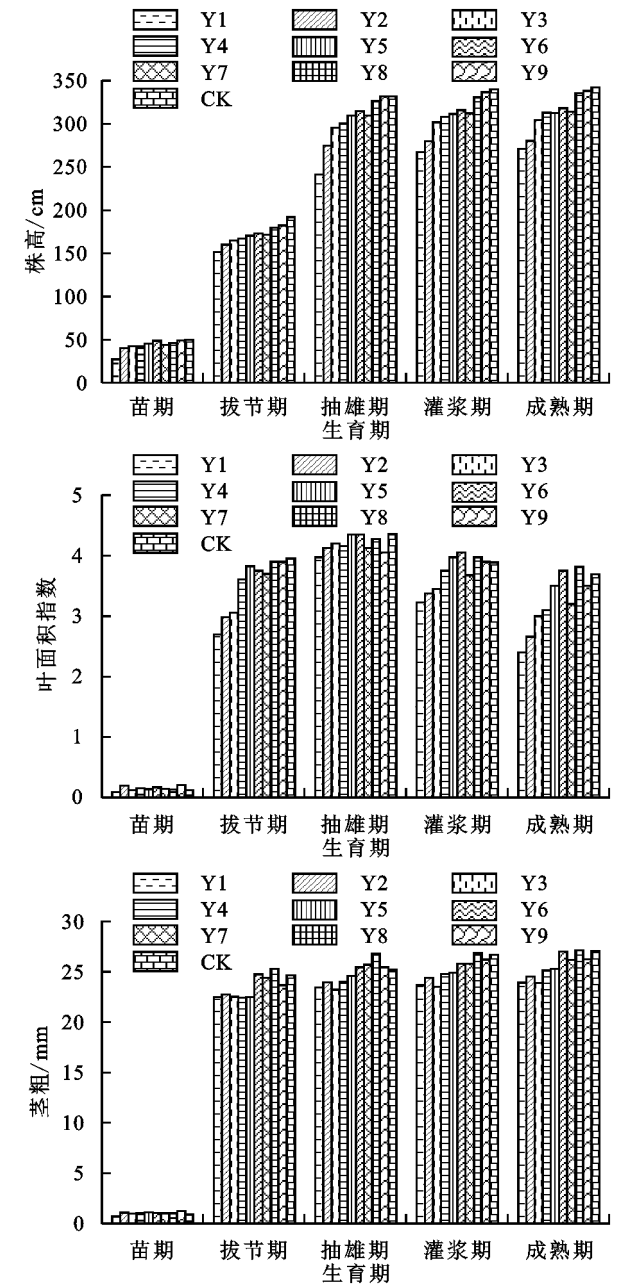


图 6 不同水肥处理对玉米生理性状的影响

表 4 不同处理下玉米产量及水分利用效率对比

处理	产量/ (kg·hm ⁻²)	生长季(播种—收获) 耗水量/mm	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
Y1	7599.44e	307.25c	24.73e
Y2	7914.41de	311.96c	25.37d
Y3	9797.13bc	322.43c	30.39d
Y4	8993.53cde	365.38b	24.61f
Y5	9351.70bc	369.61b	25.30d
Y6	11238.78b	366.34b	30.68c
Y7	12853.28a	416.97a	30.83b
Y8	13218.99a	417.82a	31.64a
Y9	12949.70a	424.71a	30.49a
CK	13781.90a	532.30a	25.89a

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.5 土壤水分和养分与玉米生长的多元逐步回归分析

2.5.1 土壤水分、养分与玉米生长的相关性分析

表 5 为各生育期土壤水分(0—100 cm 土层平均含水率)、养分(0—100 cm 土层平均硝态氮含量)与玉米生长的相关性分析。由相关性分析可知,拔节期土壤水分与玉米株高呈极显著正相关,与叶面积指数呈显著正相关;土壤养分与株高、叶面积均呈显著正相关。抽雄期土壤水分与玉米株高呈极显著正相关,土壤养分与株高相关性显著,与叶面积指数的相关性未达到显著水平。灌浆期只有土壤水分与株高的相关性达到显著水平。成熟期水分与株高,养分与株高、叶面积指数的相关性均达到显著水平。

2.5.2 各生育期土壤水分和养分对玉米生长的影响

表 5 各生育期土壤水分、养分与玉米生理性状的相关性分析

指标	拔节期				抽雄期				灌浆期				成熟期			
	水分	养分	株高	叶面积指数	水分	养分	株高	叶面积指数	水分	养分	株高	叶面积指数	水分	养分	株高	叶面积指数
水分	1.000				1.000				1.000				1.000			
养分	0.335	1.000			0.193	1.000			0.133	1.000			0.345	1.000		
株高	0.814 * *	0.793 *	1.000		0.883 * *	0.836 * *	1.000		0.769 *	0.133	1.000		0.681 *	0.736 *	1.000	
叶面积指数	0.714 *	0.680 *	0.928 * *	1.000	0.789 *	0.254	0.558	1.000	0.579	0.129	0.864 * *	1.000	0.509	0.790 *	0.894 * *	1.000

注: * 表示显著相关($P<0.05$); * * 表示极显著相关($P<0.01$)。

表 6 多元线性逐步回归分析结果

生育期	回归方程	F 值	P 值	R ²
拔节期	$y_1=0.302+0.490x_2$	6.197	0.038	0.661
	$y_2=0.252+0.761x_2$	6.792	0.031	0.679
抽雄期	$y_1=0.229+0.546x_1$	5.527	0.047	0.639
	$y_2=-0.014+0.740x_1$	9.450	0.015	0.736
灌浆期	$y_1=0.247+0.780x_1$	6.202	0.038	0.661
	$y_2=0.263+0.754x_1$	6.666	0.033	0.674
成熟期	$y_1=0.381+0.546x_1$	6.017	0.040	0.655
	$y_2=1.786+0.489x_1$	11.617	0.011	0.624

注: y_1 为株高; y_2 为叶面积指数; x_1 为土壤水分; x_2 为土壤养分。

3 讨论

(1) 玉米在生长发育过程中受到多种要素的影响, 其中灌水量是一个最关键的要素^[14]。受灌水量影响, CK 处理 0—100 cm 土层平均土壤含水率在玉米生长的整个生育期内一直处于较高水平。全生育期内玉米耗水呈增加的趋势, 拔节—抽雄期玉米耗水显著增加, 抽雄和灌浆期耗水模数达 65% 以上, 占比较大^[15-16]。

(2) 土壤硝态氮含量随生育期推进呈下降趋势, 施肥量越大, 土壤硝态氮含量越高, 低水处理下硝态氮含量大于高水处理, 说明水分不足时不利于玉米养分吸收^[9, 17]。土壤中的硝态氮累积量越少, 植物对硝态氮的利用率越高^[18]。苗期土壤硝态氮累积量最大, 说明在整个生育期内苗期玉米对养分需求最小。拔节期土壤硝态氮累积量明显下降, 且在全生育期土壤硝态氮累积量中占比最小, 即拔节期是玉米生长利

程度。相关性分析只能表明变量之间的密切程度, 并没有确切的数学模型来表达土壤水分、养分与玉米生长的因果关系, 所以采用逐步回归分析的方法, 建立不同生育期土壤水分、养分与玉米生长之间的多元回归分析。土壤水分和养分会对不同生育期的玉米生长产生不同程度的影响, 将玉米株高(y_1)、叶面积指数(y_2)作为因变量, 土壤水分(x_1)和养分(x_2)作为自变量, 进行多元逐步回归, 从而确定在玉米生长的不同生育阶段土壤水分和养分的影响程度。

由表 6 可知, 在 $\alpha=0.05$ 水平下, 计算结果满足条件, 均具有显著性意义。且除拔节期外, 水分是筛选出的影响玉米生长的关键要素。在玉米整个生育期内, 水分对玉米生长都很重要。

用氮肥的关键时期。抽雄、灌浆、成熟期土壤硝态氮累积量也呈下降趋势。主要原因是拔节期玉米快速生长, 需要吸收大量养分, 拔节期以后, 玉米由快速生长转为营养生长和生殖生长, 也需吸收一定的养分保证玉米正常生长^[19-22]。CK 各生育期土壤硝态氮累积量均比低肥、中肥和高肥处理高。

(3) 已有研究^[23-24]表明, 在有限的灌溉条件下, 配合适量的养分, 能够使水分得到更高效的利用。张富仓等^[25]研究表明, 春玉米产量和水分利用效率随灌水和施肥量的增加呈现先增长后降低的趋势。本研究中得到与之类似的结果。灌水为高水水平时, 玉米产量及水分利用效率随施肥量的增加呈先增长后降低的趋势。CK 产量与各处理相比虽为最大值, 但其水分利用效率并不高。Y7、Y8、Y9 水分利用效率较 CK 分别提高 19.1%, 22.2%, 17.8%。

(4) 本研究首先通过相关性分析, 确定土壤水分、养分与玉米产量及生理性状的相关性, 再通过多元逐步回归, 筛选出各生育期影响玉米生长的关键要素。通过逐步回归进一步明确不同生育期影响玉米生长的关键要素, 除拔节期外, 抽雄、灌浆、成熟期水分对玉米生长的影响比养分大, 水分在盐渍化土壤对作物的生长更关键^[26]。在土壤水分和养分综合作用下会对玉米生长产生不同程度的影响, 简单相关系数不包括水分和养分之间的相互作用, 不能客观地反映土壤水分和养分与玉米生长之间的准确关系, 因此除了单因子相关性分析外, 还需进行多元逐步回归分析。本试验结果基于 1 年田

间试验分析,还需进行多年田间试验进行验证。

4 结 论

(1)玉米生长的不同生育期,苗期一抽雄期玉米耗水量增长速率较大,抽雄期以后增速变缓,此外抽雄期和灌浆期的耗水模数达 65% 以上,各生育期耗水量和耗水模数为灌浆期>抽雄期>拔节期>苗期。

(2)拔节期土壤硝态氮累积量明显降低,说明玉米在拔节期快速生长阶段需要吸收大量的养分。拔节期以后,硝态氮累积量降幅减小,玉米吸收一定量养分维持正常生长。CK 各生育期土壤硝态氮累积量均比低肥、中肥和高肥处理大,过多增加氮肥不利于玉米吸收利用。

(3)CK 生理性状和产量均高于其他处理,但水分利用效率不高,因此可适当减少灌水量提高水分利用效率,减少玉米耗水量。

(4)通过运用多元逐步回归分析,进一步对各生育期影响玉米生长的水分和养分进行分析,筛选出不同生育期影响玉米生长的关键要素。结果表明,在玉米生长的拔节期,养分对玉米生长的影响较大,而在抽雄、灌浆、成熟期,水分对玉米生长的影响比养分大。因此,可以在河套灌区继续进行节水减肥研究,合理分配水资源,缓解该地区耗水量大,水分利用效率低,以及氮素流失造成的环境污染等问题。

参考文献:

[1] 闫建文,史海滨,李仙岳,等.轻度盐渍化土壤水氮对玉米光合特性及产量的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):277-284,289.

[2] Xue J, Ren L. Evaluation of crop water productivity under sprinkler irrigation regime using a distributed agrohydrological model in an irrigation district of China [J].Agricultural Water Management,2016,178:350-365.

[3] Wu Y, Shi X H, Li C Y, et al. Simulation of hydrology and nutrient transport in the Hetao Irrigation District, Inner Mongolia, China [J].Water,2017,9(3):e169.

[4] 徐昭,史海滨,李仙岳,等.水氮限量供给对盐渍化农田玉米光能利用与产量的影响[J].农业机械学报,2018,49(12):281-291.

[5] 邓西平,山仑.旱地春小麦对有限灌水高效利用的研究[J].干旱地区农业研究,1995,13(3):42-46.

[6] 郭富强,史海滨,杨树青,等.河套灌区间作模式下水肥高效利用试验研究[J].灌溉排水学报,2012,31(3):129-131.

[7] 白向历,孙世贤,杨国航,等.不同生育时期水分胁迫对玉米产量及生长发育的影响[J].玉米科学,2009,17(2):60-63.

[8] 冯乐勇,郝建平,梁改梅,等.不同栽培因素对玉米生育期土壤水分及籽粒产量的影响[J].山西农业科学,2018,46(1):29-32.

[9] 宁东峰,秦安振,刘战东,等.滴灌施肥下水氮供应对夏玉米产量、硝态氮和水氮利用效率的影响[J].灌溉排水

学报,2019,38(9):28-35.

[10] 李成,冯浩,罗帅,等.垄膜沟灌对旱区农田土壤盐分及硝态氮运移特征的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):268-275.

[11] Sepaskhah A R, Kanooni A, Ghasemi M M. Estimating water table contributions to corn and sorghum water use [J].Agricultural Water Management,2003,58(1):67-79.

[12] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements [M].Rome:Food and Agriculture of the United Nations, Irrigation and Drainage Paper NO.56, 1998.

[13] 孙占祥,邹晓锦,张鑫,等.施氮量对玉米产量和氮素利用效率及土壤硝态氮累积的影响[J].玉米科学,2011,19(5):119-123.

[14] 魏子涵,魏占民,李春强,等.不同灌溉方式对玉米植株生长参数及产量的影响[J].水土保持研究,2017,24(3):183-187.

[15] 齐智娟,冯浩,张体彬,等.覆膜耕作方式对河套灌区土壤水热效应及玉米产量的影响[J].农业工程学报,2016,32(20):108-113.

[16] 王海瑞,吕志远,汤鹏程,等.喷灌条件下不同灌溉施肥对玉米耗水和产量的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(3):72-77,107.

[17] 丁宗江.干旱沙区可降解膜覆盖下滴灌农田水氮互作效应及灌溉制度优化[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.

[18] 王美荣,闫建文,史海滨,等.沙地水肥耦合对玉米生长及产量的影响[J].节水灌溉,2018(6):16-19.

[19] 王激清,李占台,刘社平.施肥模式对温室番茄生长和土壤硝态氮时空分布的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(11):31-36.

[20] 王激清,刘社平,韩宝文.施氮量对冀西北春玉米氮肥利用率和土壤硝态氮时空分布的影响[J].水土保持学报,2011,25(2):138-143.

[21] 彭龙,吕志远,郭克贞,等.毛乌素沙地水肥耦合对玉米的生长发育及产量的影响[J].节水灌溉,2016(4):7-10.

[22] 唐文雪,马忠明,王景才.施氮量对旱地全膜双垄沟播玉米田土壤硝态氮、产量和氮肥利用率的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(6):58-63.

[23] 尹光华,刘作新,李桂芳,等.水肥耦合对春小麦水分利用效率的影响[J].水土保持学报,2004,18(6):156-158,162.

[24] 张婉晴,王秀茹,周杨.滴灌条件下秸秆覆盖与施肥对夏玉米水肥利用效率的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):139-146.

[25] 张富仓,严富来,范兴科,等.滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响[J].农业工程学报,2018,34(22):111-120.

[26] 张作为,史海滨,李祯,等.不同生育时期非充分灌溉对间作作物产量构成因子及收获指数的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(4):31-37,61.