

# 地下水埋深对辽宁中部地区膜下滴灌玉米生长及产量的影响

孙仕军<sup>1</sup>, 张岐<sup>1</sup>, 陈伟<sup>2</sup>, 隋文华<sup>1</sup>, 姜熙<sup>2</sup>, 孟维忠<sup>2</sup>

(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866; 2. 辽宁省水利水电科学研究院有限责任公司, 沈阳 110003)

**摘要:** 为探讨地下水埋深对膜下滴灌玉米生长和产量的影响, 以沈阳地区为例, 选择郑单 958 玉米品种为试验材料, 通过地下水埋深模拟系统设置地下水埋深 1.0 (D1.0), 1.5 (D1.5), 2.0 (D2.0), 2.5 (D2.5), 3.0 m (D3.0) 共 5 个处理, 对玉米生长指标、灌浆期光合作用、产量及耗水量等指标进行分析。结果表明: (1) 不同地下水埋深下的株高、茎粗和叶面积指数达到峰值时的具体表现为  $D1.0 > D1.5 > D2.0 > D3.0 > D2.5$ , 且 D1.0 和 D1.5 处理下的株高和茎粗达到峰值的日期 (播后天数) 较其他处理提前了 10~20 天。 (2) D1.0 处理下的净光合速率和蒸腾速率较其他处理分别提高 18.05%~32.89% 和 18.50%~137.24%。 (3) 产量随地下水埋深的增加呈降低趋势, 其中 D1.0 处理产量最大, 达 17 100 kg/hm<sup>2</sup>, 且产量随着地下水补给和全生育期耗水量的增加而增加。通过对玉米产量影响因素与产量间的通径分析可知, 地下水埋深通过增加叶面积指数和穗粒数使玉米增产。浅埋地下水 (1.0~2.5 m) 有助于缩短玉米生育进程, 增加叶面积指数, 从而提高叶片光合作用能力, 促进灌浆期玉米籽粒的形成, 增加穗粒数使玉米增产。研究结果可为辽宁中部及类似地区不同地下水埋深条件下玉米高产栽培和节水灌溉提供科学依据。

**关键词:** 地下水埋深; 膜下滴灌; 玉米; 产量; 通径分析

**中图分类号:** S274

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2018)05-0170-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.028

## Effects of Groundwater Depth on Growth and Yield of Maize Under Mulched Drip Irrigation in the Middle Area of Liaoning Province

SUN Shijun<sup>1</sup>, ZHANG Qi<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>2</sup>, SUI Wenhua<sup>1</sup>, JIANG Xi<sup>2</sup>, MENG Weizhong<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866;

2. Liaoning Institute of Water Resources and Hydropower Research Co., Ltd., Shenyang 110003)

**Abstract:** In order to investigate the effect of groundwater depth on maize growth and yield under mulched drip irrigation, selecting the maize of Zhengdan 958 in the case of Shenyang region as test material, five different groundwater depths of 1.0 (D1.0), 1.5 (D1.5), 2.0 (D2.0), 2.5 (D2.5) and 3.0 m (D3.0) were set up by the simulation system. The growth index, photosynthesis, yield and water consumption of maize were analyzed. The results showed that the specific performance of plant height, stem thickness and leaf area index which reached the peak value under different groundwater depths was  $D1.0 > D1.5 > D2.0 > D3.0 > D2.5$ . Besides, D1.0 and D1.5 treatments could shorten time after planting when plant height and stem thickness reached the peak by 10~20 days. Compared with other treatments, the net photosynthetic rates and transpiration rates were increased under D1.0 by 18.05%~32.89% and 18.50%~137.24% respectively. Maize yield decreased with the increasing groundwater depths, and the yield of D1.0 was the largest, reaching 17 100 kg/hm<sup>2</sup>. And maize yield increased with the increasing groundwater recharge and water consumption during the whole growth period. Through the path analysis between maize yield factors and yield, it turned out that groundwater depth improved maize yield by increasing leaf area index and grain numbers. In conclusion, groundwater depth of 1.0~2.5 m could shorten the process of maize growth, increase maize yield by increasing the maize leaf area index, then improve the photosynthesis capacity, promote the formation of maize grain in the filling stage, and finally increase grain numbers. These findings could provide scientific guidance for maize planting and water-saving irrigation under different groundwater depths in the middle

收稿日期: 2018-05-10

资助项目: 国家重点研发计划重点专项 (2018YFD0300301); 国家自然科学基金项目 (51609137); 辽宁省自然科学基金项目 (20180550617); 辽宁省教育厅项目 (2009A630, L2014268)

第一作者: 孙仕军 (1969—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业节水和水资源综合利用研究。E-mail: sunshijun2000@yeah.net

area of Liaoning Province.

**Keywords:** groundwater depth; drip irrigation under mulching; maize; yield; path analysis

玉米(*Zea mays* L.)是中国第一大粮食作物,近年来播种面积始终呈稳定上升趋势<sup>[1]</sup>,但与欧美等发达国家相比,我国玉米单产水平仍有较大提高潜力<sup>[2]</sup>。在水资源短缺的背景下,建设高效节水型农业是今后一段时期我国农业发展的主要任务之一<sup>[3]</sup>。膜下滴灌作为一种高效节水灌溉技术近年来在我国北方地区作物栽培实践中得到大面积推广和应用,膜下滴灌可为作物根区均匀供水供肥,具有增温保墒、抑盐、提高光能利用率和节水增产等特点<sup>[4-5]</sup>。关于膜下滴灌对玉米生长及产量的影响已有不少研究,刘洋等<sup>[6]</sup>研究表明,与地面灌相比,膜下滴灌显著提高了玉米百粒重,从而使产量提高18%~25%。Zhang等<sup>[7]</sup>研究表明,在保证玉米产量情况下,膜下滴灌较常规灌溉能够节水10%~20%。

地下水埋深大小对作物生长发育有重要影响。适宜的地下水位能够改善作物的土壤水分环境,提高根系活力、作物的根冠关系和冠层的光合作用,进一步促进作物的生长发育、提高作物水分利用效率,最终实现节水、增产<sup>[8-9]</sup>。刘战东等<sup>[10]</sup>采用传统畦灌的灌水方式,通过对6个地下水埋深(分别为0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,3.0 m)下春玉米生长发育的分析得出,地下水埋深0.5 m时春玉米产量最高,达8 260 kg/hm<sup>2</sup>,但不利于玉米株高的生长。肖俊夫等<sup>[11]</sup>研究表明,地下水埋深对产量的影响较大,在拔节前期地下水埋深大于60 cm或在拔节后期地下水埋深小于40 cm将影响玉米总穗粒数和百粒重,导致严重减产。

以往关于地下水埋深对玉米生长及产量的影响研究大都集中于传统地面灌溉领域,而在膜下滴灌基础上,探讨地下水埋深对玉米生长及产量的影响研究甚少。鉴于此,本文研究了膜下滴灌条件下,不同地下水埋深对玉米生长指标、光合作用、产量及产量构成和耗水量的影响,采用通径分析进一步探讨玉米产量的影响因素与产量间关系,以期探寻膜下滴灌条件下地下水埋深对玉米产量影响机理,力图为辽宁中部地区优化制定玉米膜下滴灌灌溉制度提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验于2017年4—9月在辽宁省灌溉试验中心站的旱田测坑区进行。试验站位于辽宁省沈阳市黄家乡(120°30′44″E, 42°8′59″N, 海拔47 m),地处平原地带,属温带大陆性季风气候。试验期间平均气温

为21.9℃,10℃以上积温为3 015℃,累计日照时间为1 040 h,降水量为444.6 mm。试验地土壤为粉壤土,耕层0—20 cm土壤pH为7.28,含有机质21.6 g/kg,全氮0.108 g/kg,速效钾142.5 mg/kg,速效磷23.1 mg/kg,土壤容重1.37 g/cm<sup>3</sup>,田间持水量和饱和含水率分别为21%和24.8%(占干重的百分比)。

### 1.2 试验设计

供试玉米品种为郑单958。试验采用单因素完全随机试验设计,共设5个地下水埋深水平,分别为1.0(D1.0),1.5(D1.5),2.0(D2.0),2.5(D2.5),3.0 m(D3.0),通过地下水埋深模拟系统实现(图1)。该系统主要由水箱、水柱(直径0.23 m,高3 m)、测坑及连接器构成。水柱与测坑通过电磁阀连接形成一个连通器,电磁阀控制水柱中的水进出测坑;水柱与水箱通过电磁阀连接,当灌溉水使测坑水位超过原定水位时,水柱向水箱排出多余的水,当作物及土壤蒸发蒸腾耗水时,测坑的水位低于原定水位,水箱向水柱供水,计算机自动控制系统实时记录水柱的进出水量,即地下水补给与渗漏量。

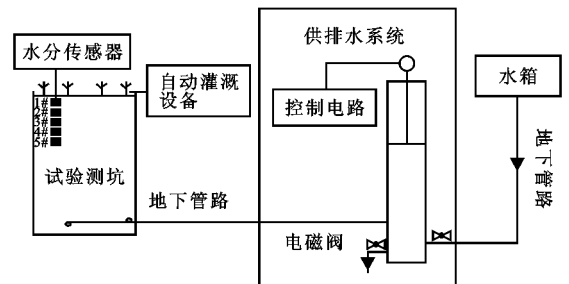


图1 地下水埋深模拟系统示意

全生育期在测坑内种植,每个处理重复3次,共15个测坑。测坑为有底的全封闭坑,每个测坑面积为5 m<sup>2</sup>(2 m×2.5 m),深度为3.5 m。为避免降雨因素的影响,试验区上方安置电动遮雨棚。测坑区灌水时间及灌水量按照土壤水分控水下限—上限的方法<sup>[12]</sup>,即当土壤含水量到达灌水控制下限时实施灌溉,灌水至土壤水分控制上限结束。灌水控制上限为田间持水量的90%,灌水控制下限在苗期和其他生育期(拔节期、抽雄吐丝期和灌浆期)分别为田间持水量的65%和70%,具体灌水方案见表1。玉米于4月27日播种,采用大垄双行种植模式,种植密度为8.4株/m<sup>2</sup>,玉米行间铺设滴灌带,具体种植模式见图2。各处理播前统一翻地,平整土地,同时灌10 mm定植水,以保证出苗率。播种后各测坑统一施三元复合肥(氮磷钾配比15:15:15)440 kg/hm<sup>2</sup>,作为底

肥,拔节期追施 290 kg/hm<sup>2</sup> 的纯 N,72 kg/hm<sup>2</sup> 的 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,100 kg/hm<sup>2</sup> 的 K<sub>2</sub>O。同年 9 月 15 日收获。其他田间管理同当地农户种植习惯保持一致。

表 1 不同地下水埋深下各生育期灌水量

| 单位:mm |      |       |       |       |       |
|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 处理    | 苗期   | 拔节期   | 抽雄吐丝期 | 灌浆成熟期 | 全生育期  |
| D1.0  | 0.0  | 24.5  | 30.0  | 0.0   | 64.5  |
| D1.5  | 12.8 | 100.7 | 71.0  | 31.6  | 226.1 |
| D2.0  | 12.8 | 105.5 | 81.0  | 57.0  | 266.3 |
| D2.5  | 12.8 | 111.1 | 82.2  | 118.9 | 335.0 |
| D3.0  | 12.8 | 118.7 | 89.3  | 80.3  | 311.1 |

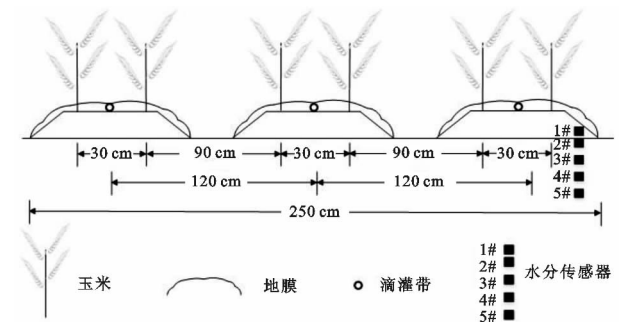


图 2 玉米膜下滴灌种植模式示意

1.3 测定指标与方法

田间水量平衡分析参数:利用埋设在土壤中的水分传感器每 30 min 监测 0—80 cm(分别为地下 0—10,10—20,20—40,40—60,60—80 cm)土层的土壤体积含水率,灌水定额计算公式为<sup>[13]</sup>: $m=0.12z(p(90\%\beta_{田}-\beta_0))$ 。式中: $m$  为灌水定额(mm); $\beta_{田}$  和  $\beta_0$  分别为土壤田间持水量和灌前土壤含水率(即作物允许的土壤含水率下限),以土壤体积含水率计算; $z$  为土壤计划湿润层深度(m),本试验中  $z$  在玉米苗期、拔节期和抽雄吐丝期分别为 0.2,0.4,0.5 m; $p$  为土壤湿润比(%),本试验  $p$  取 70%。由地下水埋深模拟系统每 30 min 自动监测测坑进出水量,进水量即地下水补给量,出水量即地下水渗漏量。作物耗水量采用水量平衡公式计算<sup>[14]</sup>: $ET=P+I-D+W_g-R+SWD$ 。式中: $ET$  为蒸散量(mm); $P$  为生育期降水量(mm); $I$  为灌溉量(mm); $D$  为土壤排水量(mm); $W_g$  为作物通过毛细管上升利用的地下水补给量(mm); $R$  为表面径流(mm); $SWD$  为玉米生育期 0—80 cm 土壤水分消耗量,指生育期末的土壤含水量与生育期初时的差值;本试验不考虑降水,故公式中  $P$  和  $R$  为 0。

生长指标:玉米进入苗期后,在各测坑中选取 3 株长势均匀、具有代表性的植株进行标记,每 10 天用卷尺测株高、用电子游标卡尺测茎粗(基部扁面)、用卷尺测选定植株上所有有效叶片的最大长和宽,并推

算出叶面积指数。  
光合作用:在灌浆期选择晴朗无云的天气采用 LCpro-SD 型光合仪(美国)测定已标定植株完全暴露在阳光下的叶片光合特性,测试指标包括净光合速率( $A$ )、蒸腾速率( $E$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_i$ )。

产量及其构成:玉米成熟时收获,进行室内考种,测定穗长、穗粗、秃尖长、每穗粒数、百粒重等指标,产量按小区实打实收,并转化为含水率 14%时的产量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 软件进行试验数据处理;采用 Origin 2016 软件制图;采用 DPS 软件进行单因素方差分析和通径分析,各组均数的多重比较选择 LSD 法( $P<0.05$ )。

2 结果与分析

2.1 不同地下水埋深下田间水量平衡分析

由表 2 可知,总体上,随着地下水埋深的增加,灌水量、灌水量与耗水量的比值均呈显著递增趋势,D1.5、D2.0、D2.5、D3.0 下的灌水量较 D1.0 的灌水量增加范围为 161.6~270.5 mm,灌水量与耗水量的比值较 D1.0 的比值增加幅度为 30.98~66.20%;而随着地下水埋深的增加,地下水补给量、耗水量及地下水补给量与耗水量的比值呈显著递减趋势,D1.5、D2.0、D2.5、D3.0 下的地下水补给量和耗水量较 D1.0 的值减少范围分别为 225.1~470.5,25.7~157 mm,D1.5、D2.0、D2.5、D3.0 下的地下水补给量与耗水量间的比值较 D1.0 的比值减小幅度为 37.85%~80.97%。从表 2 中还可以看出,D2.5 和 D3.0 下的全生育期灌水量、地下水补给量、耗水量间有一定差异,但不显著( $P>0.05$ )。

表 2 不同地下水埋深下玉米全生育期田间水量平衡分析

| 处理   | 灌水量/<br>mm | 地下水补<br>给量/mm | 耗水量/<br>mm | 灌水量/<br>耗水量/% | 地下水补给量/<br>耗水量/% |
|------|------------|---------------|------------|---------------|------------------|
| D1.0 | 64.5d      | 520.2a        | 557.0a     | 11.58c        | 93.39a           |
| D1.5 | 226.1c     | 295.1b        | 531.3a     | 42.60b        | 55.54b           |
| D2.0 | 266.3b     | 262.4b        | 492.9a     | 54.03b        | 53.24c           |
| D2.5 | 335.0a     | 57.2c         | 433.8b     | 77.22b        | 13.19d           |
| D3.0 | 311.1a     | 49.7c         | 400.0b     | 77.78a        | 12.43d           |

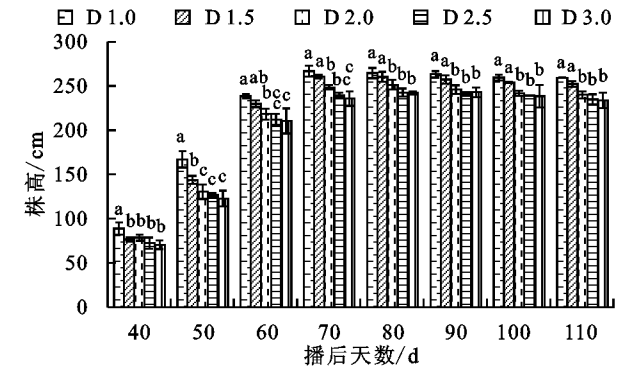
注:表中同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

2.2 地下水埋深对玉米生长指标的影响

2.2.1 地下水埋深对玉米株高的影响 由图 3 可知,株高随着生育进程的推进而不断增高,前期(玉米播种后 40~50 天)增长最迅速,株高的伸长率为 74.20%~88.20%,之后增长速度变缓,直到株高到达峰值,在玉米播种后 70~90 天,由于玉米抽雄吐丝使株高呈小幅度减小趋势。方差分析表明,不同地下水埋深对株高的影响显著。总体上,株高随地下水埋深的增

加呈降低趋势。D1.0 株高显著高于其他处理,全生育期较其他处理的株高增加 18.2~44.3 cm;D2.5 和 D3.0 下全生育期株高间则无明显差异。

由图 3 可知,不同地下水埋深下玉米株高达到峰值的时间随地下水埋深的增加呈阶梯型。在播种后 70 天,D1.0 和 D1.5 下的株高最先达到峰值,在播种



注:图中不同小写字母表示在同一播后天数下不同地下水埋深在 0.05 水平上的差异显著。下同。

图 3 不同地下水埋深下玉米播种后株高变化和株高到达峰值时播后天数

2.2.2 地下水埋深对玉米茎粗的影响 由图 4 可知,茎粗随着生育进程的推进而不断增大,前期(玉米播种后 40~50 天)增大最迅速,茎粗的增大幅度为 27.01%~45.36%,之后增大速度变缓,直到茎粗增大至峰值,在玉米播种后 60 天,不同处理下的茎粗开始呈小幅度减小趋势。方差分析表明,地下水埋深对茎粗影响显著,总体上,玉米茎粗随地下水埋深的增加呈降低趋势。D1.0 下的茎粗显著高于其他处理,全生育期较其他处理的茎粗增加 2.55~

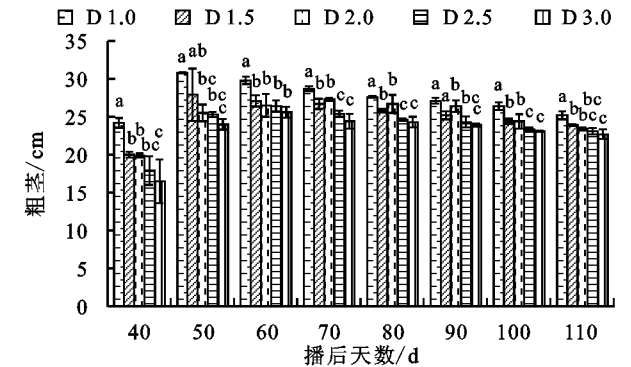
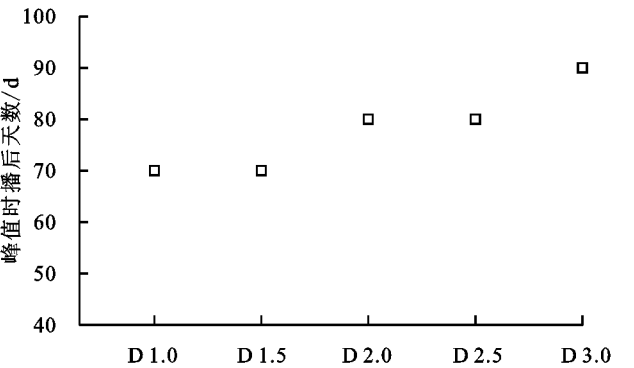


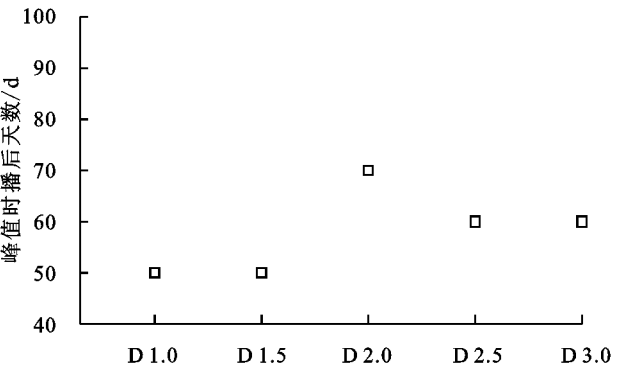
图 4 不同地下水埋深下玉米播种后茎粗变化和茎粗到达峰值时播后天数

2.2.3 地下水埋深对玉米叶面积指数的影响 由图 5 可知,叶面积指数(LAI)随着生育进程的推进而不断增大,前期(玉米播种后 40~50 天)增大最迅速,此时 LAI 的增大幅度为 146.43%~192.05%,之后增大速度变缓,直到 LAI 增大至峰值,在玉米播种后 90 天,由于植株底部叶片变黄、萎蔫使 LAI 开始呈减小趋势。方差分析表明,不同地下水埋深对 LAI 的影响显著,D1.0 下的 LAI 显著高于其他处理,全生育期较其他处理的 LAI 增加 0.39~1.69;D2.5 和 D3.0 下全生

后 80 天,D2.0 和 D2.5 下的株高达到峰值,在播种后 90 天,D3.0 下的株高达到峰值。D1.0 和 D1.5 下的株高达到峰值的播后天数较其天处理减少 10~20 天。不同地下水埋深下玉米株高达到峰值时具体表现为 D1.0>D1.5>D2.0>D3.0>D2.5,与 D1.0 相比,其天处理的株高降低幅度为 2.2%~10.4%。



7.71 cm;D2.5 和 D3.0 下全生育期茎粗间则无明显差异。不同地下水埋深下玉米茎粗达到峰值的时间随地下水埋深的增加呈倒“V”形。在播种后 50 天,D1.0 和 D1.5 下的茎粗最先达到峰值,在播种后 60 天,D2.5 和 D3.0 下的茎粗达到峰值,而最后到达峰值的是 D2.0 下的茎粗。不同地下水埋深下玉米茎粗达到峰值时具体表现为 D1.0>D1.5>D2.0>D3.0>D2.5,与 D1.0 相比,其他处理的茎粗降低幅度为 9.42%~20.29%。

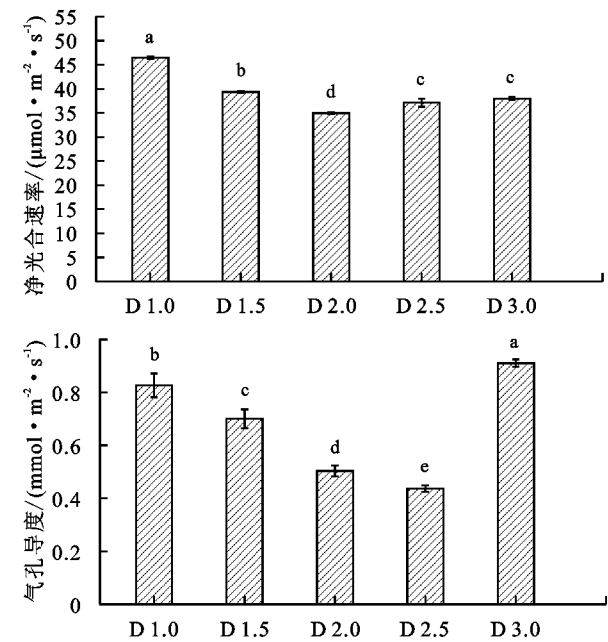


育期 LAI 间则无明显差异。在播种后 80 天,所有处理的 LAI 都达到峰值,具体表现为 D1.0>D1.5>D2.0>D3.0>D2.5,与 D1.0 相比,其他处理的 LAI 降低幅度为 8.57%~14.29%。

### 2.3 地下水埋深对玉米光合作用的影响

灌浆期是玉米形成产量的重要时期,本文以灌浆期(玉米播种后 80 天)为例,探讨不同地下水埋深下光合作用变化态势(图 6)。方差分析表明,不同地下水埋深对叶片的净光合速率(A)、蒸腾速率(E)、气孔

导度( $G_s$ )及细胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )具有显著影响。由图 6 可知,不同地下水埋深下的净光合速率和蒸腾速率的变化规律具有相似性,净光合速率和蒸腾速率的变化随着地下水埋深的增大呈“V”形,D1.0、D1.5、D2.0 下的 A 和 E 随地下水埋深的增大呈显著下降趋势,而 D2.5、D3.0 下的 A 和 E 随地下水埋深的增大呈增加趋势,D2.0、D2.5 下的 A 和 E 位于“V”形的最低处,是不同地下水埋深下的 A 和 E 变化的转折点。D1.0 下的 A 和 E 较其他处理显著提高幅度分别为 18.05%~32.89%和 18.50%~137.24%;D3.0 下的气孔导度显著高于其他处理,D1.0、D1.5、D2.0、D2.5 下的  $G_s$  随地下水埋深的增大呈显著下降趋势。D1.5 下的细胞间  $\text{CO}_2$  浓度显著高于其他



注:图中不同小写字母表示灌浆期不同地下水埋深在 0.05 水平上差异显著。

图 6 不同地下水埋深下灌浆期玉米光合作用

2.4 地下水埋深对玉米产量及其构成因素的影响

由表 3 可知,不同地下水埋深下的产量随地下水埋深的增加呈降低趋势,与 D1.0 相比,其他处理的产量降低幅度为 1.98%~8.26%。在产量构成方面,不同地下水埋深下产量构成因素间存在显著差异。D1.0 下的产量最大( $17\ 100\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ),其穗粗和穗粒数也最大(分别为 5.2 cm 和 720);D1.5 下的产量次之( $16\ 762\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ),其百粒重最大(40.6 g)。由此说明,穗粗、穗粒数和百粒重是使玉米增产的主要构成因素。

表 3 地下水埋深对产量及其构成因素的影响

| 处理   | 穗长/<br>cm | 穗粗/<br>cm | 穗粒数    | 百粒重/<br>g | 产量/<br>( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) |
|------|-----------|-----------|--------|-----------|---------------------------------------------|
| D1.0 | 20.9a     | 5.2a      | 720.0a | 36.3b     | 17100.0a                                    |
| D1.5 | 20.4b     | 5.1ab     | 677.3b | 40.6a     | 16762.5a                                    |
| D2.0 | 21.0a     | 5.0ab     | 666.7b | 37.1b     | 16032.0b                                    |
| D2.5 | 20.0c     | 4.9b      | 666.7b | 38.2b     | 15816.0b                                    |
| D3.0 | 20.3bc    | 5.0b      | 668.0b | 38.0b     | 15682.5b                                    |

处理,D1.0、D1.5、D2.0 下的  $C_i$  变化随地下水埋深的增大先增加后减小,D2.5、D3.0、D3.5 处理下的  $C_i$  随地下水埋深的增大呈显著上升趋势。

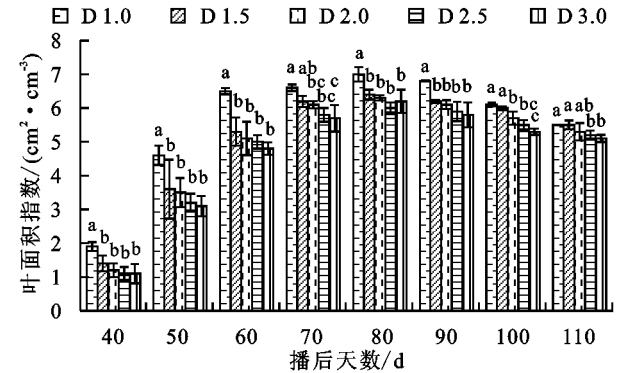
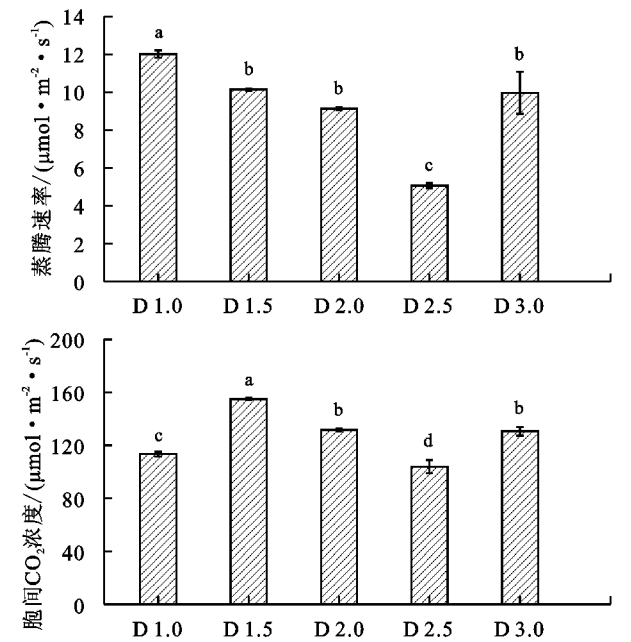


图 5 不同地下水埋深下玉米播种后叶面积指数变化



2.5 不同地下水埋深下玉米产量影响因素与产量关系

玉米灌浆成熟期是形成籽粒和实现高产的关键时期,本文选取灌浆成熟期的株高(X1)、茎粗(X2)、叶面积指数(X3)和灌浆期净光合速率(X4)作为影响产量的影响因子,得到不同地下水埋深下玉米产量与产量影响因素的相关系数和通径系数。由表 4 可知,玉米产量与各指标间呈正相关,与叶面积指数呈极显著正相关。通过产量与各指标的直接通径系数可以看出,各指标对产量的影响依次为叶面积指数>茎粗>株高>净光合速率;通过产量与各指标的间接通径系数可以看出,株高通过叶面积指数对产量的影响最大,茎粗通过叶面积指数对产量的影响最大,叶面积指数通过茎粗对产量的影响最大,净光合速率通过叶面积指数对产量的影响最大。由此说明,不同地下水埋深主要是通过增加叶面积指数,进而增加玉米产量。

| 表 4 玉米产量与产量影响因素的相关系数和通径系数 |          |         |         |         |        |       |
|---------------------------|----------|---------|---------|---------|--------|-------|
| 指标                        | 相关系数     | 直接通径系数  | 间接通径系数  |         |        |       |
|                           |          |         | X1      | X2      | X3     | X4    |
| X1                        | 0.6048   | -0.3709 |         | -0.5308 | 1.2855 | 0.221 |
| X2                        | 0.5945   | -0.6014 | -0.3273 |         | 1.3203 | 0.203 |
| X3                        | 0.9070** | 1.5303  | -0.3116 | -0.5189 |        | 0.207 |
| X4                        | 0.6823   | 0.2825  | -0.2901 | -0.4321 | 1.122  |       |

注: \*\* 表示在 0.01 水平上差异显著。

3 讨论

在考虑地下水补给的条件下浅埋深地下水能够大大减少灌水量,提高节水潜力。本研究对比不同地下水埋深(分别为 1.0,1.5,2.0,2.5,3.0 m)对玉米全生育期灌水量的影响。结果表明,地下水埋深 1.0 m 下的全生育期灌水量较其他处理减少幅度为 161.6~246.6 mm。这是因为地下水埋深较浅时,地下水可通过毛细管作用充分供给包气带,使土壤含水率增大<sup>[15]</sup>;而随地下水埋深的增加,地下水向上运动到达土壤表层的路径增加,毛细管作用减弱,使得水分上行速度减缓,最终导致土壤剖面含水率显著减小,故灌水量增加<sup>[16]</sup>。本研究还发现,浅埋深地下水处理下的玉米耗水量主要来源于地下水补给,当地下水埋深 1.0 m 时玉米耗水量 93.39%来源于地下水补给,与 Huo 等<sup>[17]</sup>研究结果一致。

刘战东等<sup>[18]</sup>研究表明,地下水埋深对玉米叶面积指数和茎粗具有显著影响,对株高影响不显著。而本研究发现不同地下水埋深对玉米生长指标(株高、茎粗和叶面积指数)均有显著影响。本研究还发现,地下水埋深 2.5,3.0 m 下的玉米株高、茎粗、叶面积指数、净光合速率和产量及其构成因素间差异不显著。这是因为地下水埋深 2.5,3.0 m 下的灌水量、地下水补给量和耗水量无显著差异,而在影响作物生长发育的诸多因子中,土壤水分是影响作物生长发育的主要限制因子,作物对水分的利用状况与作物的生长发育和产量的形成密切相关<sup>[19]</sup>。

郭枫等<sup>[9]</sup>研究表明,地下水埋深通过影响作物的生长指标,进而影响作物产量。因此,本研究采用通径分析的方法深入分析了不同地下水埋深下玉米产量影响因素与产量间的关系。通过直接通径系数可以看出各指标对产量的影响分别为叶面积指数>茎粗>株高>净光合速率,由此表明,地下水埋深通过增加叶面积指数和穗粒数,使玉米增产<sup>[20]</sup>。

4 结论

(1)地下水浅埋条件下,玉米生长能够有效利用地下水补给量,大大减少灌水量。本试验中地下水埋

深为 1.0 m 时,玉米全生育期灌水量较其他埋深处理灌水量减少幅度达 161.6~270.5 mm,能够节水 48.2%~80.8%,节水效果明显。

(2)浅埋地下水能够缩短玉米株高和茎粗达到峰值时间,并提高灌浆期玉米叶面的光合作用能力,从而促进玉米生长和发育。

(3)地下水埋深对玉米产量的影响主要是增加玉米叶面积指数,提高灌浆期玉米叶片光合作用能力,促进灌浆期玉米籽粒的形成,增加穗粒数使玉米增产。

参考文献:

[1] 陈志君,孙仕军,张旭东,等. 东北雨养区覆膜和种植密度对玉米田间土壤水分和根系生长的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(1):224-229.

[2] 孙仕军,樊玉苗,许志浩,等. 东北雨养区地膜覆盖条件下种植密度对玉米田间土壤水分和产量的影响[J]. 生态学杂志,2014,33(10):2650-2655.

[3] 侯琨. 玉米膜下滴灌对土壤水热运移的影响及增产效益研究[D]. 北京:北京林业大学,2015.

[4] Wan S, Jiao Y, Kang Y, et al. Drip irrigation of waxy corn (*Zea mays* L. var. *ceratina*, Kulesh) for production in highly saline conditions [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 104(10): 210-220.

[5] 王允喜,李明思,蓝明菊. 膜下滴灌土壤湿润区对田间棉花根系分布及植株生长的影响[J]. 农业工程学报, 2011,27(8):31-38.

[6] 刘洋,栗岩峰,李久生,等. 东北半湿润区膜下滴灌对农田水热和玉米产量的影响[J]. 农业机械学报,2015,46(10):93-104.

[7] Zhang G Q, Wang K R, Xiao C H, et al. Effect of drip irrigation on yield and water use efficiency of spring maize with high yield in Xinjiang [J]. *Journal of Maize Sciences*,2015,23(4):117-123.

[8] Yang X, Chen Y, Pacenka S, et al. Effect of drip irrigation on yield and water use efficiency of water productivity in the North China Plain [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 522: 428-438.

[9] 郭枫,郭相平,袁静,等. 地下水埋深对作物的影响研究现状[J]. 中国农村水利水电,2008(1):63-65.

[10] 刘战东,肖俊夫,牛豪震,等. 地下水埋深对冬小麦和春玉米产量及水分生产效率的影响[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(1):29-33.

[11] 肖俊夫,南纪琴,刘战东,等. 不同地下水埋深夏玉米产量及产量构成关系研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6):36-39.

[12] 中华人民共和国水利部. SL 13—2015 灌溉试验规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2015.

- at small scales [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(8): 932-940.
- [7] Li X R, Tian F, Jia R L, et al. Do biological soil crusts determine vegetation changes in sandy deserts? Implications for managing artificial vegetation [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(25): 3621-3630.
- [8] 杨志鹏, 李小雁, 刘连友, 等. 毛乌素沙地固沙灌木树干茎流特征[J]. *科学通报*, 2008, 53(8): 939-945.
- [9] Li X Y, Liu L Y, Gao S Y, et al. Stemflow in three shrubs and its effect on soil water enhancement in semi-arid loess region of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(10): 1501-1507.
- [10] Llorens P, Domingo F. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions: A review of studies in Europe [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 335: 37-54.
- [11] Kai S, Ebermann N, Schalling N. Evidence of double-funneling effect of beech trees by visualization of flow pathways using dye tracer [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 470/471: 184-192.
- [12] 孙涛, 唐进年, 韩福贵, 等. 旱区荒漠灌丛沙堆研究进展及展望[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(4): 351-356.
- [13] 杨新国, 赵伟, 陈林, 等. 荒漠草原人工柠条林土壤与植被的演变特征[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(4): 590-594.
- [14] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 23-30.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 511-525.
- [16] 杜建会, 严平, 董玉祥. 干旱地区灌丛沙堆研究现状与展望[J]. *地理学报*, 2010, 65(3): 339-350.
- [17] 孟杰, 卜崇峰, 张兴昌, 等. 移除和沙埋对沙土生物结皮土壤蒸发的影响[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(1): 58-62, 159.
- [18] 王月, 李程, 李爱德, 等. 白刺沙堆退化与土壤水分的关系[J]. *生态学报*, 2015, 35(5): 1407-1421.
- [19] 张军红, 吴波. 干旱、半干旱地区土壤水分研究进展[J]. *中国水土保持*, 2012(2): 40-43.
- [20] Li B, Gao J R, Wang X R, et al. Effects of biological soil crusts on water infiltration and evaporation Yanchi Ningxia, Maowusu Desert, China [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2016, 31(4): 311-323.
- [21] Liu B, Zhao W Z, Liu Z L, et al. Changes in species diversity, aboveground biomass, and vegetation cover along an afforestation successional gradient in a semiarid desert steppe of China [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 81: 301-311.
- (上接第 175 页)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50485—2009 微灌工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [14] Zhang D, Yao P W, Na Z, et al. Soil water balance and water use efficiency of dryland wheat in different precipitation years in response to green manure approach [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: e26856.
- [15] Laversa D A, Hannahb D M, Bradleyb C. Connecting large-scale atmospheric circulation, river flow and groundwater levels in a chalk catchment in southern England [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523(1): 179-189.
- [16] 郝远远, 徐旭, 黄权中, 等. 土壤水盐与玉米产量对地下水埋深及灌溉响应模拟[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 128-136.
- [17] Huo Z, Feng S, Dai X, et al. Simulation of hydrology following various volumes of irrigation to soil with different depths to the water table [J]. *Soil Use & Management*, 2012, 28(2): 229-239.
- [18] 刘战东, 刘祖贵, 俞建河, 等. 地下水埋深对玉米生长发育及水分利用的影响[J]. *排灌机械工程学*, 2014, 32(7): 617-624.
- [19] 殷文, 陈桂平, 柴强, 等. 前茬小麦秸秆处理方式对河西走廊地膜覆盖玉米农田土壤水热特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(15): 2898-2908.
- [20] 李广浩, 赵斌, 董树亭, 等. 控释尿素水氮耦合对夏玉米产量和光合特性的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(9): 1406-1415.