

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.027

# 土壤水基质势膜下滴灌春玉米生长和耗水特性研究

姬祥祥<sup>1,2</sup> 徐芳<sup>1,2</sup> 刘美含<sup>3</sup> 冯浩<sup>1,4</sup> 何建强<sup>1,2</sup> 张体彬<sup>1,4</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;

3. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

4. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:**为缓解内蒙古河套灌区水资源短缺并实现农业节水,在河套灌区开展连续两年(2016年和2017年)的田间试验,采用膜下滴灌种植春玉米,设置5个基于土壤水基质势的灌水下限水平,分别为-10 kPa(S1)、-20 kPa(S2)、-30 kPa(S3)、-40 kPa(S4)、-50 kPa(S5),研究不同灌溉处理下的土壤水分分布与春玉米生长及耗水特性。研究表明,2个生长季内不同基质势水平下土壤含水率差异明显,基质势越高,土壤剖面平均体积含水率越高;不同土壤水基质势下限控制的灌水水平显著影响玉米生长,随着生育期内土壤水基质势控制下限的降低,玉米株高与叶面积指数显著降低( $p < 0.05$ ),其中S5处理玉米发生早衰现象;地上部干物质积累量、百粒质量、穗粒数等产量构成指标都随土壤水基质势下限的升高而增加;土壤水基质势水平越高,玉米产量越高,其中S1、S2和S3处理玉米产量显著高于S4和S5,但是前三者之间不存在显著差异( $p < 0.05$ );随着土壤水基质势的降低,水分利用效率先增大后减小,-30 kPa时水分利用效率最高。综合考虑作物产量和水分利用效率,建议将河套灌区玉米膜下滴灌土壤水基质势下限控制在-30 kPa为宜。

**关键词:**春玉米;河套灌区;膜下滴灌;土壤水基质势;水分利用效率

中图分类号:S274.1;S513 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2018)11-0230-10

## Investigation on Growth and Water Use of Spring Maize under Mulched Drip Irrigation Based on Soil Matric Potential

Ji Xiangxiang<sup>1,2</sup> XU Fang<sup>1,2</sup> LIU Meihan<sup>3</sup> FENG Hao<sup>1,4</sup> HE Jianqiang<sup>1,2</sup> ZHANG Tabin<sup>1,4</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Water Conservation and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

4. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The Hetao Irrigation District in the Inner Mongolia is one of the most important bases for commodity grains in China. However, there was a substantial reduction in the total water quantity diverted from the Yellow River. In order to alleviate the crisis of water shortage and promote agricultural water-saving in the irrigation district, a two-year field experiment was conducted, in which five different threshold values of soil matric potentials (SMP) were set to trigger the mulched drip irrigation for spring maize, i. e., -10 kPa (S1), -20 kPa (S2), -30 kPa (S3), -40 kPa (S4) and -50 kPa (S5). The soil water distribution, crop growth, and water use efficiency (WUE) were studied for the different treatments. The results showed that soil water contents varied significantly at different SMP threshold values during the two growing seasons of spring maize. The weighted averages of volumetric water content in the 0 ~ 60 cm soil profile were increased significantly with the increase of SMP ( $p < 0.05$ ). When

收稿日期:2018-05-25 修回日期:2018-07-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0403303)、国家自然科学基金项目(51509238)和陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016KTZDNY03-06)

作者简介:姬祥祥(1993—),男,博士生,主要从事节水灌溉与水土资源高效利用研究,E-mail:jixiang@nwafu.edu.cn

通信作者:张体彬(1983—),男,副研究员,博士,主要从事农业节水灌溉与盐碱地改良研究,E-mail:zhangtbin@163.com

under lower SMP threshold values, plant height and leaf area index (LAI) of maize were relatively lower during the growing season. And premature senility of maize was observed when under the SMP threshold value of  $-50$  kPa. Aboveground biomass, hundred-grain weight and number of grains per spike were increased with the increase of SMP threshold values. When under higher SMP threshold values, higher maize yields were obtained. The yields of treatments of S1, S2 and S3 were significantly higher than those of S4 and S5 ( $p < 0.05$ ), but there were no significant difference among S1, S2 and S3. With the decrease of SMP threshold value, WUE was increased first and then decreased. The highest WUE value was obtained when under the SMP threshold value of  $-30$  kPa. Therefore, both taking into account the yield and WUE, it was recommended that the SMP value of  $-30$  kPa can be the threshold value to trigger mulched drip irrigation for spring maize production in the Hetao Irrigation District.

**Key words:** spring maize; Hetao Irrigation District; mulched drip irrigation; soil matric potential; water use efficiency

## 0 引言

内蒙古河套灌区是亚洲最大的一首制自流灌区, 现有引黄灌溉面积  $6.0 \times 10^5$   $\text{hm}^2$  以上, 是我国重要的商品粮、油基地。引黄灌溉对发展河套灌区农业生产起着决定性作用, 然而由于长期大水漫灌、渠系渗漏与排水不畅等原因, 造成灌区地下水位抬升, 土壤盐渍化日益严重<sup>[1]</sup>。目前, 灌区现有不同程度的盐渍化耕地约  $3.9 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ , 已占耕地总面积的 70% 左右<sup>[2]</sup>。近年来, 随着农业种植业经济效益的增加, 灌溉面积有增加的趋势, 但由于黄河水资源日益紧缺, 河套灌区引黄配额从 50 余亿立方米减少至 40 亿立方米左右<sup>[3]</sup>。因此, 土壤盐渍化严重和地表水资源紧缺之间的矛盾制约着河套灌区农业生产的可持续发展。

膜下滴灌技术具有节水、抑蒸、增产等优点<sup>[4-5]</sup>, 在旱区节水农业生产和盐碱地改良利用中发挥着重要作用<sup>[6-9]</sup>。随着土壤盐渍化的日益严重和地表水资源的紧缺, 膜下滴灌技术在河套灌区逐渐引起重视<sup>[10-12]</sup>, 制定科学合理的灌溉制度是推广膜下滴灌技术的前提, 而根据土壤水基质势制定灌溉制度是目前较为先进的方法之一。土壤水基质势是衡量土壤基质对水分吸附能力的物理量。土壤水总是由水势高处向低处流动, 土壤水势可分为压力势、基质势、重力势、温度势和溶质势。在农田中基质势是决定土壤水势的关键因子, 它是由土壤基质(固体)的吸附力和毛管力造成的势能。土壤水势绝对值越高, 土壤含水率越小, 土壤对水的吸力越强, 作物越难吸收利用, 否则越容易吸收利用。如将真空负压计埋在滴头正下方 20 cm 深度处监测土壤水基质势, 可以反映土壤中可供植物吸收的有效水分的供给状况<sup>[13]</sup>。通过控制土壤水基质势下限(即只要土壤水基质势低于预定的阈值就进行灌水), 可以科学合理地制定膜下滴灌灌溉制度, 这在我国多个地区多种作物上得到了利用。例如, 一些研

究<sup>[11,14-16]</sup>分别利用控制土壤水基质势下限的方法为我国甘肃、宁夏等地区土豆、番茄、玉米滴灌探寻出适宜的土壤水基质势下限范围。

膜下滴灌灌溉制度中, 具体的土壤水基质势下限与当地气候条件、土壤类型、作物种类等密切相关, 明确不同基质势水平下的土壤水分分布状况和作物生长耗水特性则是制定膜下滴灌灌溉制度的重要前提。但相关研究在河套灌区开展相对较少, 不同土壤基质势水平下土壤水分运移和分布特征以及作物生长和耗水的响应机制尚不明确。这在一定程度上制约了膜下滴灌技术在河套灌区的推广和使用。

本文通过在河套灌区连续进行的两年春玉米田间试验, 研究基于土壤水基质势的不同膜下滴灌条件下土壤水分状况和春玉米生长的响应机制, 明晰不同土壤水基质势水平对土壤水分状况和春玉米生长及耗水特性的影响, 以期为膜下滴灌技术在河套灌区的推广和使用提供理论依据和技术指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古自治区河套灌区的曙光试验站( $40^{\circ}46'N$ ,  $107^{\circ}24'E$ , 海拔 1 039 m), 地处干旱半干旱气候带, 属典型的温带大陆性气候。全年日照充足, 昼夜温差较大, 降水量集中, 蒸发强烈, 空气干燥。试验站多年平均气温  $6.9^{\circ}\text{C}$ , 其中 1 月均温  $-14 \sim -11^{\circ}\text{C}$ , 7 月均温  $22 \sim 24^{\circ}\text{C}$ ,  $0 \sim 20$  cm 土层平均地温  $9.4^{\circ}\text{C}$ 。相对湿度 51%, 气压 89.82 kPa。风大而频繁, 年均风速为  $2.8 \sim 2.9$  m/s。全年日照时数为 3 190 ~ 3 260 h, 年总辐射量为  $6 151.2 \sim 6 383.1$   $\text{MJ}/\text{m}^2$ ,  $10^{\circ}\text{C}$  以上活动积温 3 000 ~ 3 280  $^{\circ}\text{C}$ 。 $0 \sim 40$  cm 土壤  $\text{EC}_{1:5}$ (土水比 1:5 浸提液电导率)一般在  $0.6 \sim 1.6$   $\text{dS}/\text{m}$  之间, pH 值为 8.3 左右, 在灌区内属于典型盐渍化区域, 有较强的代表性。试验站内设有地下水源井。试验田每年的秋季采用引黄

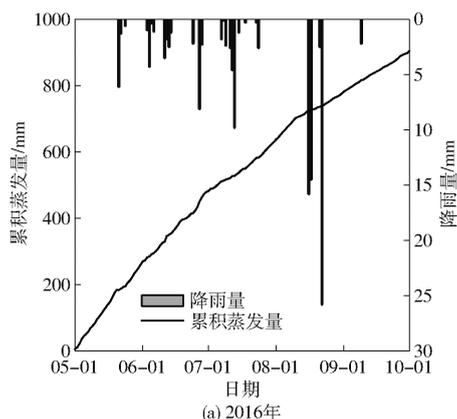
水漫灌秋浇。试区内土壤属于黄河灌淤土,土壤分层明显,厚薄不均(表1)。田间试验在2016年和2017年玉米生长季内(5—10月)进行,其中2016

年生长季内累积降雨量为123 mm,蒸发量达904.9 mm;2017年生长季内累积降雨量仅为37 mm,蒸发量为948.8 mm(图1)。

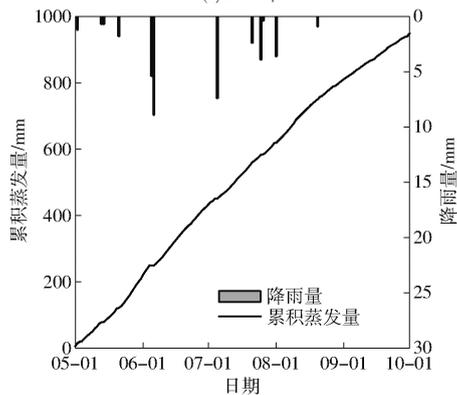
表1 试验地土壤(0~120 cm)基本理化性质

Tab.1 Physical and chemical properties of soils (0~120 cm) in experimental site

土层/ cm	颗粒组成(质量分数)/%			容重/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	有机质质量比/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	田间持水量/ ( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ )	饱和导水率/ ( $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ )	电导率/ ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ )
	砂粒	粉粒	黏粒					
0~20	32.2	47.8	20.0	1.4	7.3	0.29	0.14	1.63
20~40	23.2	53.8	23.0	1.4	6.7	0.31	0.11	0.81
40~60	29.7	47.2	23.1	1.4	6.3	0.31	0.07	0.56
60~90	94.3	3.7	2.0	1.5	3.0	0.28	25.07	0.45
90~120	48.3	35.4	15.3	1.4	5.3	0.31	0.22	0.56



(a) 2016年



(b) 2017年

图1 河套灌区玉米生育期内降雨量与累积蒸发量

Fig.1 Precipitations and accumulative evaporations during two growing seasons of spring maize in Hetao Irrigation District

## 1.2 试验设计

膜下滴灌田间试验种植作物为春玉米“西蒙6号”。试验设置5个土壤水基质势水平,分别控制土壤水基质势(Soil matric potentials, SMP)下限为-10 kPa(S1)、-20 kPa(S2)、-30 kPa(S3)、-40 kPa(S4)、-50 kPa(S5),共形成5个处理,每处理3个重复,共计15个小区,小区面积为4 m×15 m,各小区之间设置1 m宽的缓冲区以减少土壤水分侧渗。各处理均采用宽窄行的种植方式,窄行和宽行行距分别为30 cm和70 cm,在窄行中间布置

滴灌带,滴灌带间距100 cm,滴头间距30 cm,玉米株距30 cm(图2)。播种前施加底肥并覆盖地膜,地膜为高压聚乙烯膜,厚度8 μm。播种深度5 cm,播种密度为66 667株/hm<sup>2</sup>。2016年播种时间为4月27日,2017年为4月28日,分别于2016年9月8日和2017年9月2日收获。

在每个处理的任选2个重复小区内安装真空表式负压计,位置为滴头正下方20 cm处(图2)。每天09:00和15:00分别观测负压计读数,一旦达到所设定的阈值,立即启动滴灌,参考当地水面日蒸发量设定灌水定额为10 mm,并记录灌溉日期和总灌水量。5个不同处理在2016年和2017年实际灌溉定额分别为336.3、205.5、141.1、100.0、70.0 mm和490.8、366.0、298.8、199.7、126.0 mm(图3)。试验地肥于播种之前耕翻时施入,其中尿素(N:46%)施入量163 kg/hm<sup>2</sup>、磷酸二胺(N:18%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:42%)施入量420 kg/hm<sup>2</sup>、硫酸钾(K<sub>2</sub>O:50%)施入量90 kg/hm<sup>2</sup>。玉米生育期内于6叶期后仅追施氮肥,采用水溶性较好的尿素,于灌水前溶于施肥罐中,随

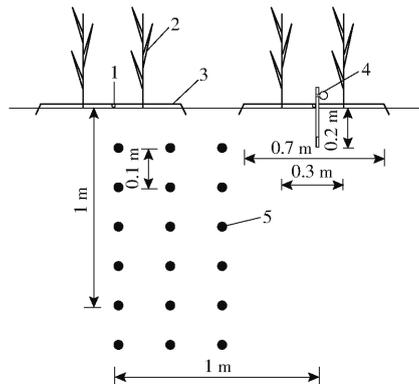


图2 河套灌区春玉米膜下滴灌试验种植模式和取样点位置示意图

Fig.2 Schematic of planting pattern and soil sampling positions of experiment of spring maize under mulched drip irrigation in Hetao Irrigation District

1. 滴头 2. 玉米 3. 地膜 4. 真空负压计 5. 取样点

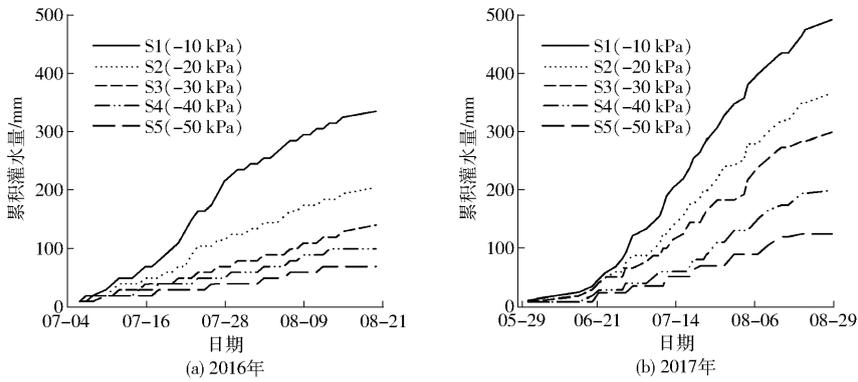


图 3 玉米生育期内 5 个不同灌溉处理的累积灌溉水量

Fig. 3 Cumulative irrigation depths of five different treatments during growing season of spring maize

灌水施入,且保证各处理施肥量一致。2016 年和 2017 年施肥量一致,玉米全生育期内纯氮累积施入量为  $300 \text{ kg/hm}^2$ 。

### 1.3 测定指标与方法

#### 1.3.1 土壤含水率

在玉米生育期内,土壤含水率每隔 15 d 测定一次,采用土钻法采集土样,采样位置为与滴头水平距离 0、25、50 cm 处,取样深度为 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~60 cm(图 2)。取回的土样在实验室采用干燥法测定土壤质量含水率,之后根据各土层土壤容重折算体积含水率。土壤 0~60 cm 剖面内的平均含水率采用加权平均法计算得出。玉米生育期耗水量采用水量平衡方程计算。

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

式中  $P_{ET}$ ——玉米生育期耗水量(ET),mm

$\Delta W$ ——播种期与收获期土壤储水量之差,mm,整个剖面的  $\Delta W$  由不同空间位置数值通过加权平均计算得出

$P$ ——生育期有效降水量,mm,如果降雨量小于当日参考蒸发蒸腾量的 0.2 倍,视为无效降雨<sup>[17]</sup>

$I$ ——玉米生育期的灌水量,mm

$G$ ——生育期地下水对作物根系的补给量,mm,详细计算过程可参考文献[18]

$R$ ——生育期地表径流量,mm,试区地势平坦,无地表径流产生

$F$ ——生育期根区深层渗漏量,mm

根据 FAO56 分册中提供的方法计算,假定降雨或灌溉先补给根系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<sup>[17]</sup>,计算方法为灌水(或降水)前 60 cm 土层内有效土壤含水率和灌水量(或降水量)相加,再减去田间持水量。

#### 1.3.2 玉米生长指标、产量和水分利用效率

在玉米生长期,定期观测物候期,并在每个小区选取具有代表性的植株 3 株,挂牌标记。每

个生育期测定一次经过标记的玉米株高和叶面积,使用钢卷尺(精度 0.1 cm)测量叶脉长度和垂直于叶脉方向叶片最宽处宽度,叶面积折算系数为 0.75<sup>[19]</sup>。根据种植密度计算叶面积指数(LAI)。在玉米的各生育期,每个小区选取 3 株具有代表性的植株,采集植株地上部分,采样后将植株按照叶、茎、雄和穗分开处理,用干燥箱烘至恒质量,测定其干物质量。收获时每个小区选取 10 株具有代表性的玉米进行考种,单穗脱粒,籽粒均脱水至恒质量,然后根据每公顷的株数计算单位面积的产量,并计算收获指数。玉米水分利用效率(WUE)的计算公式为

$$U_{WUE} = Y/P_{ET} \quad (2)$$

式中  $U_{WUE}$ ——水分利用效率,kg/( $\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ )

$Y$ ——单位面积玉米产量,kg/ $\text{hm}^2$

#### 1.3.3 统计分析

试验数据经过 Excel 2010 整理后,利用 SPSS 19.0 对数据进行单因素方差分析,利用 LSD 法检验差异显著性( $p < 0.05$ )。采用 Excel 2010、Surfer 8 和 SigmaPlot 12.5 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 同处理下土壤含水率分布特征

灌浆期是玉米需水关键时期<sup>[20-21]</sup>,该时期土壤水分状况对玉米生长和产量形成至关重要。从玉米灌浆期内各处理土壤体积含水率剖面分布(图 4),可以看出,土壤含水率在剖面内表现出明显的径向分布规律,即越远离滴头,含水率越低。不同土壤水基质势下限处理下土壤剖面含水率差异明显。2016 年灌浆期 S1~S5 处理 0~60 cm 土壤剖面体积含水率均值分别为 0.35、0.24、0.23、0.19、0.20  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ; 2017 年分别为 0.29、0.21、0.21、0.16、0.17  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ,即随着土壤水基质势下限的降低,土壤剖面体积含水率明显减小。基质势下限最低的 S5 处理剖面平均

含水率稍高于 S4 处理,这可能是由于 S5 处理土壤含水率长时间处于较低水平,使根系生长受到胁迫,吸水能力下降<sup>[22-24]</sup>,进而土壤较深层水分不能被有效吸收利用所造成的。

处理 S1 ~ S5 土壤水分由表层向深层逐渐递减(图 4),且随着基质势下限的降低土体的湿润范围也在减小,由于 S1 处理基质势下限最高,灌水频次最高,湿润体的区域最大,竖直方向上湿润范围可达 60 cm;其它处理湿润深度一般在 30 ~ 40 cm 以上。值得说明的是,在 2016 年,基质势下限最低的 S5 处理膜外(与滴头水平距离 50 cm 处)含水率出现了高于膜内区域的现象(图 4e),这可能是由于该时期(玉米灌浆期)出现了较大降雨事件(图 1),水分从

膜间裸地入渗导致,而 S5 处理由于膜下区域土壤含水率也相对较低,所以此现象较为明显;而 2017 年该时期无降雨发生,由于裸地强烈蒸发,造成无地膜覆盖区域土壤含水率明显小于膜内位置(图 4f ~ 4j)。但深度 60 cm 位置处各处理均出现了土壤含水率较大的现象,S5 处理尤为明显(图 4j),这可能是由于该时期是周围农田大面积灌水时期,造成地下水水位上升从而通过毛管作用影响根区土壤水分状况,而 S5 处理作物生长较差,根系吸水较少,所以影响更为明显。而该区域 60 ~ 90 cm 深度处土壤颗粒中砂粒含量较高(表 1),势必影响根区土壤水分与地下水的交换,特别是在地下水水位埋深较浅时的影响更为明显。

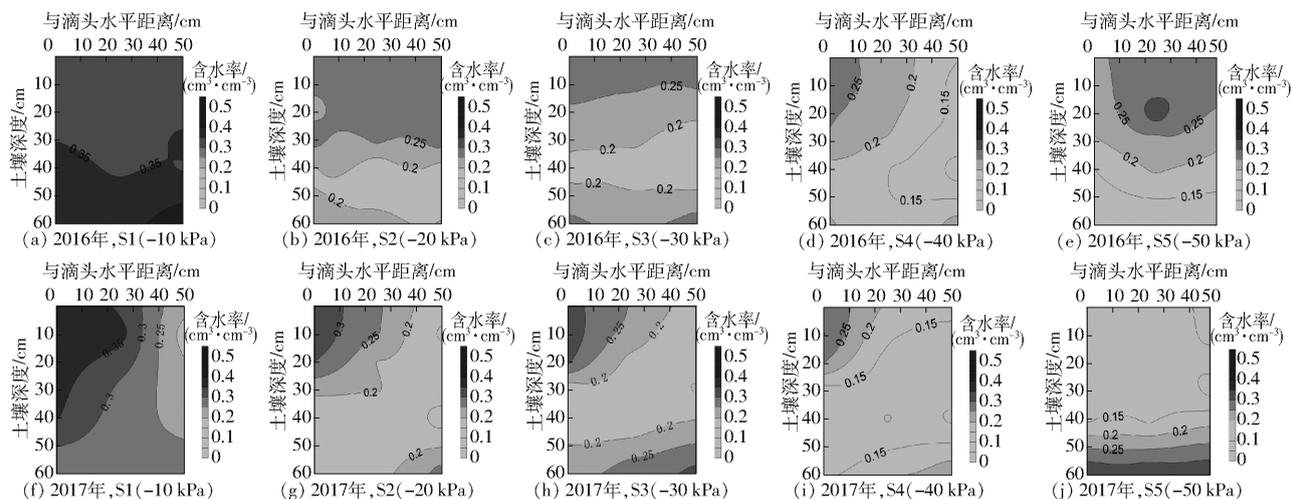


图 4 2016 年和 2017 年玉米灌浆期不同基质势下限处理下土壤含水率分布状况

Fig. 4 Soil moisture distributions at grain-filling stage of maize under different treatments of soil matric potential in 2016 and 2017

### 2.2 玉米生长动态

不同基质势处理的玉米株高变化在两年内均呈 S 型生长曲线形式(图 5)。6 月中旬到 7 月中旬正是玉米的拔节期和抽穗期,株高增长速度较快,在抽穗期达到整个生育期的最大值,且在该时期随着土壤水基质势下限而降低,玉米株高出现不同程度的减小,基质势下限水平最高的 S1 处理玉米株高最高,各处理之间差异显著,且处理差异在降雨量较少的 2017 年表现更为明显。叶面积指数(LAI)均呈现先增

大后减小的变化趋势,拔节期到抽穗期基本呈直线增长,并在抽穗期达到最大值,各处理最大值在 4 ~ 6 之间,进入成熟期后出现不同程度的减小(图 6)。其中 S1、S2 和 S3 处理的 LAI 大小在生育期内差异不明显,基本保持同步变化,从两年的变化可以看出土壤水基质势下限控制在 -30 kPa 以上时(S1、S2 和 S3 处理),玉米的叶面积指数可以维持在较高水平。而 S5 处理在抽穗期之后 LAI 出现快速减小的趋势,发生早衰现象,这是由于 S5 处理的灌水量较少导致玉米受到干旱

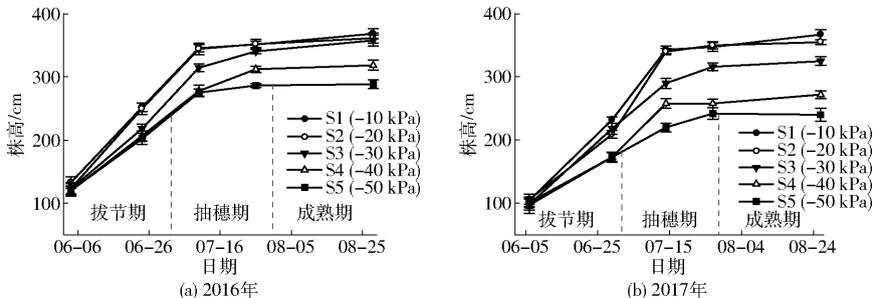


图 5 玉米生育期内不同基质势下限处理下玉米株高

Fig. 5 Dynamics of plant height of maize under different treatments of soil matric potential during two growing seasons

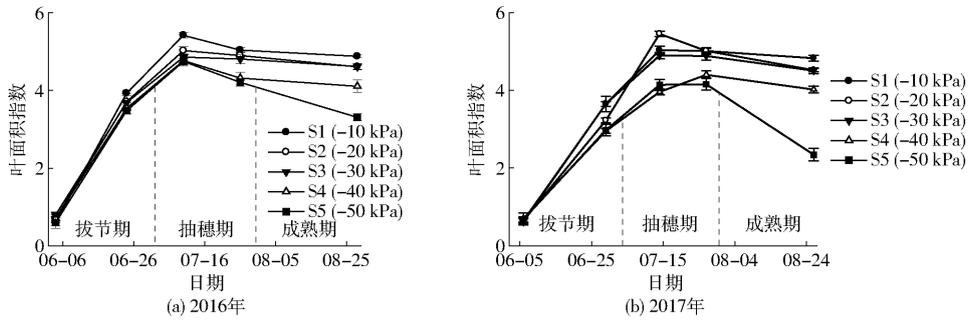


图 6 玉米生育期内不同基质势下限处理下玉米叶面积指数

Fig. 6 Dynamics of leaf area index of maize under different treatments of soil matric potential during two growing seasons

胁迫,抑制了植株茎秆的生长,同时加速了叶片的枯萎<sup>[25]</sup>。同样,在降雨量较少的2017年表现尤为明显。

### 2.3 产量及其构成因素分析

不同土壤水基质势下限,显著影响着玉米产量和产量构成(表2)。各处理间比较发现,S1、S2、S3处理产量显著高于S4和S5( $p < 0.05$ ),而前三者之间差异不显著。其中2016年S4、S5处理较S1处理分别减少12.3%、19.3%,2017年则分别减少

21.3%、54%。因此,田间土壤水基质势下限控制在-30 kPa时产量较高,当低于该下限值时不利于玉米产量的形成。对比两年的结果发现,由于2016年生育期内降雨较多,即使维持较低土壤水基质势、灌水较少的处理S4和S5也取得了较高的玉米产量,整体高于降雨较少的2017年。但是土壤水基质势下限较高的S1、S2及S3处理受自然降雨的影响不大,两年均保持较高的产量水平。

表 2 不同基质势水平对玉米产量及产量构成因素的影响

Tab. 2 Effects of different matric potentials on maize yields and yield components

年份	处理	穗行数	穗粒数	百粒质量/g	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	地上部生物量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	收获指数
2016	S1(-10 kPa)	18	654 <sup>b</sup>	42.25 <sup>a</sup>	14 924 <sup>a</sup>	28 946 <sup>a</sup>	0.52 <sup>b</sup>
	S2(-20 kPa)	18	663 <sup>a</sup>	39.77 <sup>b</sup>	14 864 <sup>a</sup>	26 970 <sup>b</sup>	0.55 <sup>b</sup>
	S3(-30 kPa)	18	638 <sup>c</sup>	39.74 <sup>b</sup>	14 112 <sup>ab</sup>	26 412 <sup>b</sup>	0.53 <sup>b</sup>
	S4(-40 kPa)	16	579 <sup>e</sup>	39.42 <sup>b</sup>	13 089 <sup>bc</sup>	22 484 <sup>c</sup>	0.58 <sup>a</sup>
	S5(-50 kPa)	16	615 <sup>d</sup>	35.61 <sup>c</sup>	12 041 <sup>c</sup>	22 210 <sup>c</sup>	0.54 <sup>b</sup>
2017	S1(-10 kPa)	18	808 <sup>b</sup>	38.39 <sup>a</sup>	16 201 <sup>a</sup>	27 813 <sup>a</sup>	0.59 <sup>a</sup>
	S2(-20 kPa)	18	799 <sup>c</sup>	38.12 <sup>a</sup>	15 794 <sup>a</sup>	27 311 <sup>a</sup>	0.59 <sup>a</sup>
	S3(-30 kPa)	18	821 <sup>a</sup>	37.02 <sup>ab</sup>	15 576 <sup>ab</sup>	26 617 <sup>ab</sup>	0.56 <sup>a</sup>
	S4(-40 kPa)	16	661 <sup>d</sup>	33.96 <sup>c</sup>	12 750 <sup>c</sup>	26 573 <sup>b</sup>	0.48 <sup>b</sup>
	S5(-50 kPa)	16	520 <sup>e</sup>	29.21 <sup>d</sup>	7 448 <sup>d</sup>	18 440 <sup>c</sup>	0.40 <sup>b</sup>

注:图中同一指标的不同字母表示存在显著性差异( $p < 0.05$ )。

从产量构成因素上看,各基质势下限处理下玉米百粒质量与穗粒数整体上随着基质势下限的提高均呈增加趋势,且两年数据显示S1、S2、S3显著高于S4、S5处理,说明玉米生育期内基质势下限控制在小于-30 kPa时,较低的土壤水基质势会引起干旱胁迫,导致玉米耗水量下降(图7),干物质的生产不能为玉米籽粒提供充足的营养物质,最终抑制了干物质积累和产量形成,从而导致穗粒数与百粒质量显著减小<sup>[26]</sup>。而基质势下限的提高直接使得根系层贮有足够的水量,保证籽粒形成过程中水分的供应,使得穗粒数及百粒质量增加。相关性分析结果表明,经济产量和穗粒数相关性最大( $R^2 = 0.81$ ),说明提高穗粒数是增产的重要途径;地上部生物量与经济产量紧密线性相关( $R^2 = 0.90$ ),收获指数范围为0.40~0.59,表明地上部干物质的积累是产量形成的基础,穗粒数多是玉米高产的关键,百粒质量

高是玉米高产的保证<sup>[27]</sup>。

### 2.4 耗水量与水分利用效率

作物ET与WUE是衡量农业水资源利用水平高低和评价节水措施的一项重要指标<sup>[28-30]</sup>。2016年各处理ET在318~388 mm,各处理间差异相对较小;而2017年S1处理(SMP为-10 kPa)的ET高达432 mm,而S5处理(SMP为-50 kPa)仅为196 mm,各处理间差异较大(图7a)。但2个生育期内玉米ET均随土壤水基质势下限呈现出显著的线性关系( $p < 0.05$ ), $R^2$ 分别为0.87(2016年)和0.99(2017年)。2个生育期内,WUE均表现为随着土壤水基质势呈先增大后减小的趋势(图7b),二者之间均呈现显著的单峰曲线关系( $p < 0.05$ ), $R^2$ 分别为0.71(2016年)和0.98(2017年)。两年的WUE峰值对应的土壤水基质势下限均为-30 kPa,WUE分别为47.8 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)(2016年)和52.5 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)

(2017年)。由于2016年降水较多可能在一定程度上掩盖了不同灌水处理之间的差异,所以处理差异

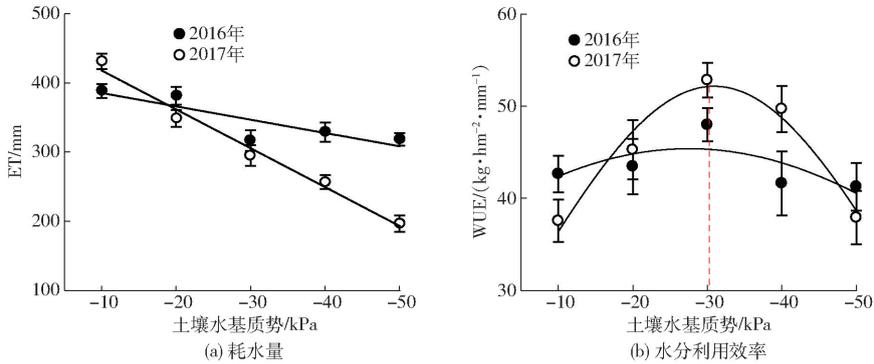


图7 不同基质势下玉米耗水量与水分利用效率

Fig. 7 Evapotranspiration and WUE of maize under different treatments of soil matrix potential

### 3 讨论

目前,大多数膜下滴灌的研究中,都是以不同土壤水分下限为依据指导田间灌溉<sup>[9,31-33]</sup>;而土壤含水率的有效性,与土壤结构有很大的关系,而不同类型的土壤,土壤结构必然存在较大差异,即便是同一种土壤,在同一块地中,也存在很大的空间变异性。在农田中种植作物时往往会施用牛粪、鸡粪、羊粪以及各种专门配制的基质,使得耕作层土壤结构变化更大,所以用土壤含水率为依据确定土壤水分的有效性,有很大的不确定性且实用性较差。而土壤水基质势摆脱土壤类型、耕作施肥等因素对土壤水分有效性的影响,能够直接衡量土壤基质对水的吸纳能力,反映土壤水分对作物的有效供给状况。通过康跃虎<sup>[13]</sup>相关领域的研究结果,发现用埋在滴头下面20 cm深处的负压计所测得的土壤水势值,能够很好地反映大部分作物根系分布层的土壤基质中的水分状况。所以利用土壤水基质势下限指导河套春玉米膜下滴灌灌溉是一种非常实用的方法。

本文以不同土壤水基质势作为单因子对河套灌区膜下滴灌春玉米生长和耗水特性进行了探究。类似地,范雅君等<sup>[9]</sup>用水分亏缺处理的方法设置了6个单因子灌水量水平,通过Jensen模型建立了玉米水分生产函数,对河套地区玉米膜下滴灌的灌溉制度进行了优化,得出玉米全生育期的耗水规律呈中间高两头低的变化,全生育期耗水量为536 mm时,其玉米产量最高为12 871 kg/hm<sup>2</sup>。相比于其他方法虽然有很好的节水效果,但是用Jensen模型制定出的灌溉制度依然存在着一定的局限性<sup>[34]</sup>,灌水量的确定不能具体到某一天。虽然与本研究一样都是以灌水量作为单因子,而本研究中对于玉米的灌水量的确定在时间尺度上完全可以具体到某一天。当基质势下限控制为-40 kPa时,2016年作物需水量

不如2017年明显。一般地,可以发现当基质势下限控制在-30 kPa时可以有效提高玉米的WUE。

为329 mm,对应产量已经达到13 089 kg/hm<sup>2</sup>,2017年为256 mm产量达到12 750 kg/hm<sup>2</sup>;所以高滴灌量处理并不是一种优选模式<sup>[35]</sup>,证明利用监测土壤水基质势下限可以更有效地指导玉米膜下滴灌,并可以提高水分利用效率。

近年来多位学者在多个地区研究并提出了不同作物各自适宜的土壤水基质势下限。杨会颖等<sup>[36]</sup>在甘肃省武威市通过膜下滴灌种植辣椒试验研究了不同土壤水基质势对辣椒产量、耗水和水分利用效率的影响,结果表明辣椒的水分利用效率随着基质势控制下限的降低呈现先升高再降低的趋势,与本文玉米作物在不同基质势下限处理下的水分利用效率变化规律类似,说明过高的土壤水基质势下限会使得作物根区水分过剩,造成水分利用效率较低,而土壤水基质势下限控制过低则会导致减产。

前人研究表明,不同作物的耗水特性不同,适宜的灌水下限也不同<sup>[37-39]</sup>;即使同一作物,在不同的气候和土壤条件下,其对于不同土壤水分的耗水响应也有可能不同,进而造成确定膜下滴灌灌水量的土壤水基质势下限不同。任中生等<sup>[40]</sup>在河套灌区开展了一年的玉米膜下滴灌田间试验,结果表明水分利用效率随基质势控制水平的升高而下降,且以土壤水基质势-40 kPa为最大。而本研究连续两年的田间试验中年际降雨差异明显,通过对比分析根区土壤水分状况和作物生长的响应及水分利用效率,发现当膜下滴灌灌水下限为-30 kPa,在不显著降低产量的同时可以获得最大的水分利用效率,这一结果与孙贯芳等<sup>[16]</sup>的研究结果一致;但与任中生等<sup>[40]</sup>的结果不同,原因是其从资源环境角度考虑了氮素玉米产量的影响。

综上,本研究结果表明将土壤水基质势下限控制在合适的范围时可以有效提高春玉米的水分利用效率,达到节水增产的效果。本研究的结果将有助

于推动膜下滴灌技术在河套灌区的推广,有助于灌区实现农业节水和盐渍化的防治。本研究的不足之处是没有考虑到施肥频率对作物生长的影响,而且田间试验设计所包含的处理数目有限,对探究适宜的土壤水基质势下限存在一定的局限性,在后面的研究中可考虑借助计算机模型来进一步增加处理数量,细化研究内容。

## 4 结论

(1) 不同土壤水基质势水平下土壤剖面水分

布差异明显,随着土壤水基质势控制下限的降低,根区土壤含水率显著降低,表明土壤水基质势水平的提高有利于提高根区土壤含水率。

(2) 当基质势下限控制在  $-30\text{ kPa}$  时,玉米产量达到较高水平,且水分利用效率最高,因此建议河套灌区膜下滴灌种植玉米的土壤水基质势下限控制在  $-30\text{ kPa}$  为宜。

(3) 土壤水基质势下限控制在适当的范围时,可以有效提高春玉米的水分利用效率,达到节水增产的效果。

## 参 考 文 献

- 1 YU R H, LIU T X, XU Y P, et al. Analysis of salinization dynamics by remote sensing in Hetao Irrigation District of North China [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(12): 1952 - 1960.
- 2 LEI T W, ISSAC S, YUAN P J, et al. Strategic considerations of efficient irrigation and salinity control on Hetao Plain in Inner Mongolia [J]. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17(1): 48 - 52.
- 3 孟春红, 杨金忠. 河套灌区秋浇定额合理优选的试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2002(5): 23 - 25.  
MENG Chunhong, YANG Jinzhong. Experimental research on the rational selection of autumn irrigation norm in Hetao Irrigation District [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2002(5): 23 - 25. (in Chinese)
- 4 康静, 黄兴法. 膜下滴灌的研究及发展[J]. *节水灌溉*, 2013(9): 71 - 74.  
KANG Jing, HUANG Xingfa. Research contents and future development of drip irrigation under plastic film [J]. *Water Saving Irrigation*, 2013(9): 71 - 74. (in Chinese)
- 5 李毅, 王文焰, 王全九. 论膜下滴灌技术在干旱-半干旱地区节水抑盐灌溉中的作用[J]. *灌溉排水学报*, 2001, 20(2): 42 - 46.  
LI Yi, WANG Wenyan, WANG Quanjiu. A breakthrough thought for water saving and salinity control in arid and semi-arid area under-film trickle irrigation [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2001, 20(2): 42 - 46. (in Chinese)
- 6 齐智娟, 冯浩, 张体彬, 等. 河套灌区不同覆膜方式膜下滴灌土壤盐分运移研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 301 - 308.  
QI Zhijuan, FENG Hao, ZHANG Tibin, et al. A study on soil salinity movement of drip irrigation under different film mulching treatment in Hetao Irrigation District [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 301 - 308. (in Chinese)
- 7 周立峰, 吴淑芳, 齐智娟, 等. 基于作物耗水特性的夹砂地膜下滴灌模式优选[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(9): 183 - 190. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170923&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170923&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.023.  
ZHOU Lifeng, WU Shufang, QI Zhijuan, et al. Optimal mode selection of mulched drip irrigation in sand kayered field based on water consumption characteristics[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(9): 183 - 190. (in Chinese)
- 8 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.  
QI Zhijuan, FENG Hao, ZHANG Tibin, et al. Effects of mulch and tillage methods on soil water and temperature as well as corn yield in Hetao Irrigation District[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(20): 108 - 113. (in Chinese)
- 9 范雅君, 吕志远, 田德龙, 等. 河套灌区玉米膜下滴灌灌溉制度研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(1): 123 - 129.  
FAN Yajun, LÜ Zhiyuan, TIAN Delong, et al. Irrigation regime for corn production with drip irrigation and plastic mulching in Hetao Irrigation Region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(1): 123 - 129. (in Chinese)
- 10 ZHANG H, XIONG Y, HUANG G, et al. Effects of water stress on processing tomatoes yield, quality and water use efficiency with plastic mulched drip irrigation in sandy soil of the Hetao Irrigation District [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 205 - 214.
- 11 LIU H, WANG X, ZHANG X, et al. Evaluation on the responses of maize (*Zea mays* L.) growth, yield and water use efficiency to drip irrigation water under mulch condition in the Hetao Irrigation District of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 144 - 157.
- 12 于健, 杨金忠, 徐冰, 等. 内蒙古河套灌区三种水源形式滴灌发展潜力[J]. *中国水利*, 2015(19): 50 - 53.  
YU Jian, YANG Jinzhong, XU Bing, et al. Potentiality of drip irrigation development for three types of water source in Hetao Irrigation Districts of Inner Mongolia [J]. *China Water Resources*, 2015(19): 50 - 53. (in Chinese)
- 13 康跃虎. 实用型滴灌灌溉计划制定方法[J]. *节水灌溉*, 2004(3): 11 - 12.  
KANG Yaohu. Applied method for drip irrigation scheduling[J]. *Water Saving Irrigation*, 2004(3): 11 - 12. (in Chinese)
- 14 KANG Y, WANG F X, LIU H J, et al. Potato evapotranspiration and yield under different drip irrigation regimes [J]. *Irrigation Science*, 2004, 23(3): 133 - 143.

- 15 KANG Y, WAN S. Effect of soil water potential on radish (*Raphanus sativus* L.) growth and water use under drip irrigation [J]. *Scientia Horticulturae*, 2005, 106(3): 275 - 292.
- 16 孙贯芳, 屈忠义, 杜斌, 等. 不同灌溉制度下河套灌区玉米膜下滴灌水热盐运移规律[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(12): 144 - 152.  
SUN Guanfang, QU Zhongyi, DU Bin, et al. Water-heat-salt effects of mulched drip irrigation maize with different irrigation scheduling in Hetao Irrigation District [J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(12): 144 - 152. (in Chinese)
- 17 CHIVENGE P P, MURWIRA H K, GILLER K E, et al. Long-term impact of reduced tillage and residue management on soil carbon stabilization: implications for conservation agriculture on contrasting soils [J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 94(2): 328 - 337.
- 18 GILL K S, GAJRI P R, CHAUDHARY M R, et al. Tillage, mulch and irrigation effects on corn (*Zea mays* L.) in relation to evaporative demand [J]. *Soil & Tillage Research*, 1996, 29(3 - 4): 213 - 227.
- 19 周元刚, 李华龙, 蒋腾聪, 等. 夏玉米叶片形状系数的时间和空间变异[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(23): 4520 - 4530.  
ZHOU Yuangang, LI Hualong, JIANG Tengcong, et al. Temporal and spatial variations of leaf shape coefficients of summer maize [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(23): 4520 - 4530. (in Chinese)
- 20 李凤英, 黄占斌, 山仑, 等. 夏玉米水分利用效率的时空变化规律研究[J]. *西北植物学报*, 2000, 20(6): 1010 - 1015.  
LI Fengying, HUANG Zhanbin, SHAN Lun, et al. A study on rules of spatio-temporal change and water use efficiency of corn [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20(6): 1010 - 1015. (in Chinese)
- 21 张岁岐, 周小平, 慕自新, 等. 不同灌溉制度对玉米根系生长及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 1 - 6.  
ZHANG Suiqi, ZHOU Xiaoping, MU Zixin, et al. Effects of different irrigation patterns on root growth and water use efficiency of maize [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(10): 1 - 6. (in Chinese)
- 22 张岁岐, 山仑. 根系吸水机理研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2001, 7(4): 396 - 402.  
ZHANG Suiqi, SHAN Lun. Research progress on water uptake in plant roots [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2001, 7(4): 396 - 402. (in Chinese)
- 23 胡田田, 康绍忠, 原丽娜, 等. 根区湿润方式对玉米根系生长发育的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 6180 - 6188.  
HU Tiantian, KANG Shaozhong, YUAN Li'na, et al. Effects of partial root zone irrigation on growth and development of maize root system [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6180 - 6188. (in Chinese)
- 24 康绍忠, 蔡焕杰. 作物根系分区交替灌溉和调亏灌溉的理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- 25 方缘, 张玉书, 米娜, 等. 干旱胁迫及补水对玉米生长发育和产量的影响[J]. *玉米科学*, 2018, 26(1): 89 - 97.  
FANG Yuan, ZHANG Yushu, MI Na, et al. Effect of drought stress and water-recharge to maize growth and yield [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(1): 89 - 97. (in Chinese)
- 26 许高平, 王璞, 薛绪掌, 等. 负压控水下不同株型玉米水分利用效率和产量的盆栽试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(15): 148 - 156.  
XU Gaoping, WANG Pu, XUE Xuzhang, et al. Experiment on water use efficiency and yield of different plant type of potted maize under negative pressure water control [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(15): 148 - 156. (in Chinese)
- 27 柯福来, 马兴林, 黄瑞冬, 等. 高产玉米品种的产量结构特点及形成机制[J]. *玉米科学*, 2010, 18(2): 65 - 69.  
KE Fulai, MA Xinglin, HUANG Ruidong, et al. Characteristics of yield components and formation mechanism of high-yield maize hybrids [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2010, 18(2): 65 - 69. (in Chinese)
- 28 彭世彰, 朱成立. 作物节水灌溉需水规律研究[J]. *节水灌溉*, 2003(2): 5 - 8.  
PENG Shizhang, ZHU Chengli. Study on the water requirement rules of crops under water saving irrigation [J]. *Water Saving Irrigation*, 2003(2): 5 - 8. (in Chinese)
- 29 李荣生, 许煌灿, 尹光天, 等. 植物水分利用效率的研究进展[J]. *林业科学研究*, 2003, 16(3): 366 - 371.  
LI Rongsheng, XU Huangcan, YIN Guangtian, et al. Advances in the water use efficiency of plant [J]. *Forest Research*, 2003, 16(3): 366 - 371. (in Chinese)
- 30 冯浩, 刘晓青, 左亿球, 等. 砾石覆盖量对农田水分与作物耗水特征的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 155 - 163. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160521&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160521&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.021.  
FENG Hao, LIU Xiaoqing, ZUO Yiqiu, et al. Effect of gravel mulching degree on farmland moisture and water consumption features of crops[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5): 155 - 163. (in Chinese)
- 31 冯海萍, 曲继松, 张丽娟, 等. 典型旱作区不同田间持水量对塑料拱棚春茬番茄光合生理特性的影响[J]. *江苏农业学报*, 2014, 30(2): 381 - 387.  
FENG Haiping, QU Jisong, ZHANG Lijuan, et al. Photosynthetic characteristics of vinyl house spring tomato affected by field capacity in dry-farming area [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 30(2): 381 - 387. (in Chinese)
- 32 龚雪文, 刘浩, 孙景生, 等. 不同水分下限对温室膜下滴灌甜瓜开花坐果期地温的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 2935 - 2943.  
GONG Xuewen, LIU Hao, SUN Jingsheng, et al. Effects of irrigation threshold on soil temperature in blossom and fruit-set

- periods of muskmelon under mulching-drip irrigation in greenhouse [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(10): 2935–2943. (in Chinese)
- 33 何雨江, 汪丙国, 王在敏, 等. 棉花微咸水膜下滴灌灌溉制度的研究[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 14–20.  
HE Yujiang, WANG Bingguo, WANG Zaimin, et al. Study on irrigation scheduling of cotton under mulch drip irrigation with brackish water [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(7): 14–20. (in Chinese)
- 34 李玉婷, 缴锡云, 罗玉峰. Jensen 模型敏感指数随机误差对耗水量优化计算结果的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(24): 219–223.  
LI Yuting, JIAO Xiyun, LUO Yufeng. Effect of stochastic error of sensitivity indexes of Jensen's model on optimal water consumption [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(24): 219–223. (in Chinese)
- 35 姜良超, 仝川, 胡敏杰, 等. 河套灌区玉米光合特征及产量对全膜覆盖下不同滴灌量的响应[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 289–297.  
JIANG Liangchao, TONG Chuan, HU Minjie, et al. Responses of maize photosynthesis and yield to different drip irrigation amounts with full film mulching in the Hetao Irrigation District [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4): 289–297. (in Chinese)
- 36 杨会颖, 刘海军, 李艳, 等. 膜下滴灌条件下土壤基质势对辣椒产量和水分利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(1): 54–60.  
YANG Huiying, LIU Haijun, LI Yan, et al. Effects of soil matrix potential on yield and water use efficiency of hot pepper under mulched drip irrigation [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(1): 54–60. (in Chinese)
- 37 焦艳平, 康跃虎, 万书勤, 等. 干旱区盐碱地覆膜滴灌条件下土壤基质势对糯玉米生长和灌溉水利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(6): 144–151.  
JIAO Yanping, KANG Yaohu, WAN Shuqin, et al. Effect of soil matrix potential on waxy corn growth and irrigation water use efficiency under mulch drip irrigation in saline soils of arid areas [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(6): 144–151. (in Chinese)
- 38 冯棣, 刘晓菲, 康跃虎, 等. 地下滴灌不同土壤水分调控对马铃薯产量和灌溉水利用效率的影响[J]. *节水灌溉*, 2015(8): 42–44.  
FENG Di, LIU Xiaofei, KANG Yaohu, et al. Response of potato yield and irrigation water use efficiency to different soil water control under subsurface drip irrigation [J]. *Water Saving Irrigation*, 2015(8): 42–44. (in Chinese)
- 39 WANG F X, KANG Y, LIU S P, et al. Effects of soil matrix potential on potato growth under drip irrigation in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 88(1–3): 34–42.
- 40 任中生, 屈忠义, 李哲, 等. 水氮互作对河套灌区膜下滴灌玉米产量与水氮利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 149–155.  
REN Zhongsheng, QU Zhongyi, LI Zhe, et al. Interactive effects of nitrogen fertilization and irrigation on grain yield, water use efficiency and nitrogen use efficiency of mulched drip-irrigated maize in Hetao Irrigation District, China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(5): 149–155. (in Chinese)