

# 灌水量对全膜垄作沟灌玉米产量及水分利用效率的影响

曾爱国

(甘肃省武威市农业技术推广中心, 甘肃 武威 733000)

**摘要:** 针对河西灌区水资源紧缺的问题, 探索玉米合理的灌溉量, 以期指导区域玉米合理灌溉。通过在石羊河流域设置不同的灌水量梯度, 研究不同灌水量对全膜垄作沟灌玉米产量及水分利用效率, 以及土壤含水率、产量要素的影响。结果表明: 全膜垄作沟灌玉米灌水量从  $4\ 500\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  增加到  $4\ 725\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $4\ 950\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 产量并没有随着灌水量的增加而增加, 灌水量增加到  $5\ 175\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 在水分利用效率没有降低的情况下, 产量相对于  $4\ 500$ 、 $4\ 725\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $4\ 950\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  处理明显增加 11.46%、8.39% 和 8.54%, 其中果穗长度、穗粒数和百粒重平均增加 4.88%、3.27% 和 4.31% 是其产量增加的主要原因。对于土壤含水率, 玉米需水盛期的 7 月 16 日至 8 月 3 日,  $5\ 175\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  处理显著高于其他三个处理, 而灌浆期各处理间则差异不显著。与播前期相比, 收获期土壤含水率降低层主要集中在 20~80 cm 土层, 土层贮水量平均降低 6.72 mm, 且各处理 0~110 cm 土层贮水量差异并不明显。因此, 本研究表明  $5\ 175\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  为石羊河流域全膜垄作沟灌条件下的适宜灌溉量, 但灌浆中后期的最后一次灌水应考虑适当降低灌水量。

**关键词:** 玉米; 灌水量; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S274.1 文献标志码: A

## Effects of irrigation amount on maize yield and water use efficiency under full mulching with ridge seeding and furrow irrigating

ZENG Ai-guo

(Wuwei Agro-technical Extension Center, Wuwei, Gansu 733000, China)

**Abstract:** Field experiments were employed to find the effects of different irrigation amount on maize yield and water use efficiency under full mulching with ridge seeding and furrow irrigating in Shiyang river basins. It turned out the yield did not increase with the increase of irrigation amount from  $4\ 500\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  to  $4\ 725\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $4\ 950\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ . However, without decrease in water use efficiency, when the irrigation amount increased to  $5\ 175\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , the yield increased by 11.46%, 8.39% and 8.54% in the treatments of  $I_{180}$ ,  $I_{195}$  and  $I_{210}$  respectively. The increase was mainly attributed to the average increase in spike length by 4.88%, grain number by 3.27% and 100-grain mass by 4.31%. The soil water content was significantly higher in  $I_{225}$  treatment in the other three treatments at water demand peak by corn (from 16 July to 3 August), while there was no significant difference in the treatments at filling stage. Compared with the seeding stage, the decreased layers of soil water content were mainly located at 20~80 cm soil layers at harvest, and soil water storage decreased by an average of 6.72 mm. There was no significant differences of the soil water storage among treatments at 0~110 cm soil layers. It was concluded that  $5\ 175\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  was the appropriate irrigation amount for maize under full mulching with ridge seeding and furrow irrigating in Shiyang river basins, but at the late filling stage it was desirable to reduce the irrigation amount appropriately.

**Keywords:** maize; irrigation amount; yield; water use efficiency

石羊河流域是甘肃河西三大内陆河流域之一, 总耕地面积约 41.7 万  $\text{hm}^2$ , 农田灌水量占整个区域

收稿日期: 2015-11-30

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项“现代农作制模式构建与配套技术研究示范”项目(201103001)

作者简介: 曾爱国(1966—), 甘肃民勤人, 高级农艺师, 主要从事土壤改良培肥、科学施肥及农田节水技术研究与推广。

E-mail: wwtzq@126.com

供水量的 86.4%<sup>[1]</sup>。近年来,由于人口增加、社会经济发展和水土资源的大规模开发利用引起了一系列水文和生态环境变化,严重制约了区域经济的可持续发展 and 人居环境的可持续改善<sup>[2]</sup>。所以,寻求合理的作物灌溉量,保证作物产量及水分利用效率,减少水资源浪费成为区域农业可持续发展的关键。绿洲主要作物及不同种植方式需水规律研究表明,玉米应采用“六水”灌溉法,即播前水、拔节水、孕穗水、抽雄水、灌浆水、乳熟水,灌水定额分别为 900、900、1 050、1 275、1 260、1 140  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[3]</sup>,而石羊河流域作物的需水量及需水规律的研究表明,春玉米应采用较为理想的“五水”灌溉法,即拔节期、大喇叭口期、吐丝期、灌浆期和成熟期灌水,相应的适宜灌溉量为 1 200、1 200、900、1 100  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[4]</sup>,同样石羊河流域灌溉量对制种玉米干物质积累及产量性状的影响研究表明玉米全生育期灌溉量 5 250  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  时,对玉米产量、果穗长度、百粒重等影响较大,可作为当地适宜的节水灌溉量,继续增加灌溉量后,相应产量等指标出现不升反降的趋势<sup>[5]</sup>。这些研究主要集中在灌溉量对玉米产量、产量构成因素及水分利用效率的影响,从而衡量区域玉米适宜灌溉量,而对于灌溉量在影响玉米产量、产量构成因素及水分利用效率情况下土壤含水率及水分变化状况的影响的研究却较少。地膜覆盖技术由于其明显的增温、节水和增产效果,成为石羊河流域一项重要的农业增产和节水的技术手段<sup>[6]</sup>,随着作物覆膜方式的成熟,全膜垄作沟灌栽培技术由于其较为明显的保墒、增温、抑制水分蒸发的效果,在区域内的应用越来越普及<sup>[7-9]</sup>。因此,本研究通过在石羊河流域玉米全膜垄作沟灌条件下设置不同的灌溉量梯度,研究(1)不

同灌溉量对玉米土壤含水量及其变化的影响;(2)不同灌溉量对玉米产量构成要素的影响;(3)不同灌溉量对玉米产量及水分利用效率的影响,以期为区域内发展节水型现代农作制模式技术提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验地点位于武威市凉州区金羊镇平苑村,海拔 1 506 m,年均气温 7.8℃,无霜期 155 d,年降雨量 158 mm,蒸发量 2 020 mm,年总日照时数 2 945 h,  $\geq 0^\circ\text{C}$  积温为 3 513.4℃,  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温为 2 985.4℃。土壤类型为厚层灌漠土,土层深厚,土壤质地为壤土,通透性好,无障碍层,适种性广,井水灌溉。本研究在 2010 年度进行,生育期降雨量 70.9 mm,土壤 pH 值 8.2,有机质 18.8  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,碱解氮 73.4  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效磷 29.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾 164.9  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,田间持水量 23.2%,土壤容重 1.57  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

### 1.2 试验设计

试验共设 4 个灌水处理,具体灌溉量见表 1,各小区灌溉量用水表严格计量,供试玉米品种为武科 2 号,采用全膜垄作沟灌栽培,垄宽 60 cm,沟宽 40 cm,沟深 18 cm,幅宽 120 cm 地膜覆盖垄沟,每垄播种 2 行,行距 50 cm,株距 24 cm,保苗 82 500 株  $\cdot \text{hm}^{-2}$ 。试验于 4 月 23 日用枪式穴播器播种,于起垄覆膜前基施(13-17-15)复合肥 900  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,分别在拔节期、大喇叭口期用追肥枪穴施尿素 300  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和 150  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。田间采用完全随机实验设计,小区面积为 60  $\text{m}^2$ ,小区长 6 m,宽 10 m,重复 3 次。

表 1 水分处理方案

Table 1 The irrigation amount program of water treatment

处理代号 Treatments	灌水定额 Irrigation amount/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$					灌溉总量 Irrigation amount / $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$
	冬储灌 Wintering stage	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Trumped stage	抽雄吐丝期 Silking stage	灌浆期 Filling stage	
I <sub>180</sub>	1800	900	600	600	600	4500
I <sub>195</sub>	1800	900	675	675	675	4725
I <sub>210</sub>	1800	900	750	750	750	4950
I <sub>225</sub>	1800	900	825	825	825	5175

### 1.3 样品采集与测定

土壤样品:各小区覆膜前、播前、每次灌水前、灌水后和收获后用土钻分别采集 0~110 cm 剖面土壤样品,田间取样时每小区设 2 个采样点,其中 0~30 cm 为每 10 cm 一层,30~50 cm 为一层,50~110 cm

每 30 cm 为一层,2 个样点同一土层土壤样品混合作为一个分析样品,采用烘干法测定土壤含水量。

植株样品:玉米收获时各小区选择长势一致的植株考种,分别测定株高、穗位高、穗长、秃顶长、穗粒数、百粒重,并分小区收获计产。

## 1.4 数据计算与统计分析

1) 土壤贮水量(mm) =  $\rho \times h \times \omega \times 10$ 。式中, $\rho$ 为实测土壤容重( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), $h$ 为土层厚度(cm), $\omega$ 为土壤水分(%)。

2) 水分利用效率( $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) =  $Y_a / E_{ta}$ ,其中, $Y_a$ 为单位面积的籽粒产量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), $E_{ta}$ 为生育期耗水量(mm)。

数据统计分析和图表制作采用 Microsoft Excel 2007 及 DPS 7.05 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌水量处理对玉米土壤含水率变化的影响

通过分析不同灌溉量对玉米播前期和收获期 0~110 cm 土层土壤含水率变化的影响(见图 1),玉

米不同灌水量处理播前期和收获期 0~110 cm 土层具有相同的土壤含水率分布趋势,与播前期土壤含水率相比,收获期不同灌水量处理 0~10 cm 土壤含水率均得到较好的恢复,但 20~110 cm 土层含水率却有不同程度降低,且降低层主要集中在 30~80 cm。分析土层贮水量, $I_{180}$ 、 $I_{195}$ 、 $I_{210}$ 和  $I_{225}$ 处理收获期 0~110 cm 土层贮水量为 297.33、293.15、291.63 mm 和 288.64 mm,相对于播前期分别减少 18.89、18.56、28.11 mm 和 16.09 mm,差异不明显,且 20~80 cm 土层贮水量较播前期平均减少 6.72 mm。表明本试验条件下,玉米不同灌水量处理播前期和收获期具有相同的土壤含水率分布趋势,同时各处理收获期土层贮水量没有明显差异,与播前期相比,收获期土壤含水率降低层主要集中在 20~80 cm,该土层贮水量平均减少 6.72 mm。

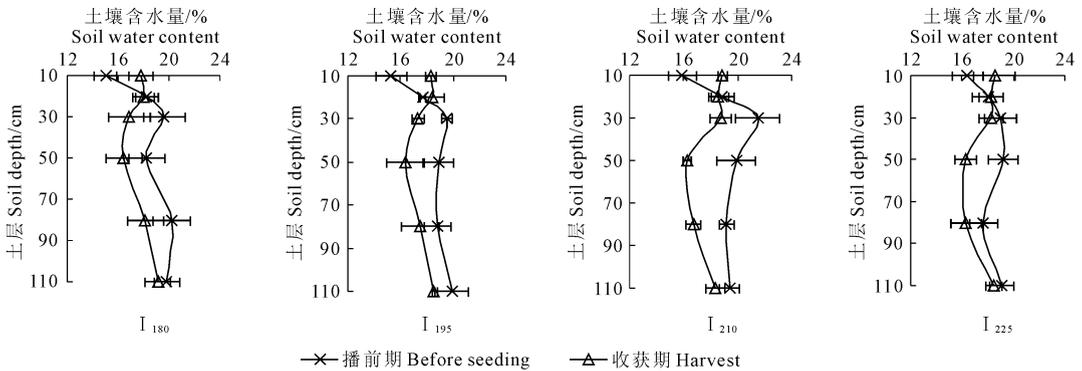


图 1 不同灌溉量对玉米播前期和收获期 0~110 cm 土层土壤含水率变化的影响

Fig.1 Effects of different amount treatments on soil water content in 0~110 cm soil layers before seeding and at harvest of maize

### 2.2 不同灌水量处理对土壤含水率动态变化的影响

由 0~110 cm 土壤含水率动态变化(见图 2)可知,不同灌水量处理间土壤水分差异随生育期的推进逐渐减小,不同处理间水分差异由 7 月 10 日的 17.64% 减小为 9 月 3 日的 4.93%,到玉米灌浆期不同处理间差异不显著( $P > 0.05$ ),可见不同灌水梯度对玉米土壤水分的影响在 8 月 26 日玉米灌浆后逐渐减弱,因此在玉米灌浆中后期的最后一次灌水宜选择灌水量最低的  $I_{180}$  处理灌溉。7 月 16 日和 8 月 3 日各处理土壤水分以  $I_{225}$  处理为高,其他三个灌水处理间水分差异不显著( $P > 0.05$ ),7 月 30 日、8 月 26 日和 9 月 3 日各处理间水分差异不显著( $P > 0.05$ ),表明在玉米需水盛期的 7 月 16 日至 8 月 3 日, $I_{225}$  处理对土壤水分的影响显著大于其他三个处理,此期(玉米二、三水)宜选择灌水量最高的  $I_{225}$  处

理灌溉。

### 2.3 不同灌水量处理对玉米产量构成因素的影响

玉米产量构成因素表明(见表 2),不同灌水量处理对玉米株高和穗位高的影响不显著,但增加灌水量后, $I_{210}$ 和  $I_{225}$  处理相对于  $I_{180}$ 和  $I_{195}$  处理玉米的果穗长度显著增加,平均增加 6.27%。果穗秃顶长  $I_{180}$ 、 $I_{195}$ 和  $I_{225}$  处理之间差异不显著,但显著高于  $I_{210}$  处理,平均增加 0.23 cm。随着灌水量的增加,玉米穗粒数和百粒重并没有显著增加,但  $I_{225}$  处理相对于其他三个处理却有明显增加趋势,穗粒数和百粒重平均增加 3.27% 和 4.31%。说明本试验条件下,灌水量对玉米株高和穗位高影响不显著,但灌水量增加到  $5\ 175\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  时,玉米果穗长度显著增加,穗粒数和百粒重也有明显增加趋势。

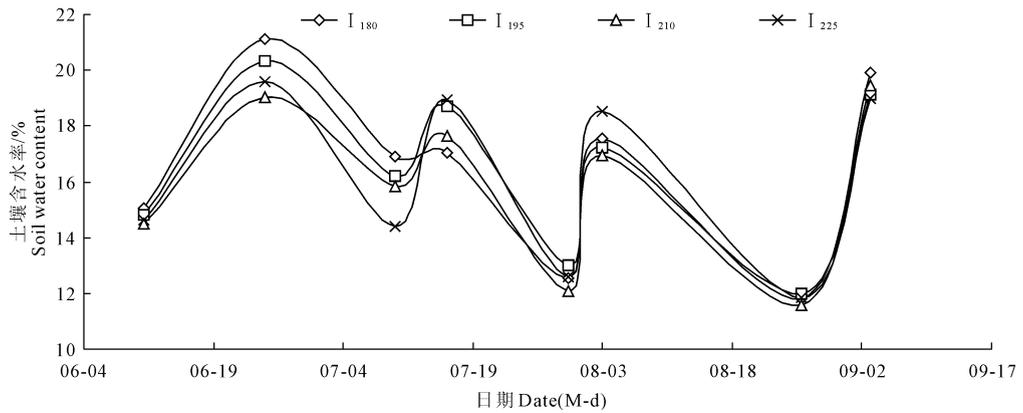


图2 各处理 0~110 cm 土壤含水率动态变化

Fig. 2 Soil water content variation in 0~110 cm soil layers under different amount treatments

表 2 不同灌水量处理玉米产量构成因素

Table 2 Yield components of corn treated with different amount

处理 Treatments	株高 Plant length /cm	穗位高 Ear height /cm	果穗长 Spike length /cm	秃顶长 Bald tip length/cm	穗粒数 Grain number /个	百粒重 100-grain mass/g
I <sub>180</sub>	249.8a	134.7a	16.7b	0.90a	493.4ab	34.6b
I <sub>195</sub>	253.2a	132.4ab	16.8b	0.90a	489.5b	34.9b
I <sub>210</sub>	254.9a	135.3a	17.7a	0.65b	504.2ab	34.9b
I <sub>225</sub>	252.7a	135.8a	17.9a	0.85a	511.9ab	36.3ab

注:同列数据后不同小写字母表示 LSD 检验在  $P < 0.05$  水平上差异显著,下同。

Note: Different small letters following values in the same column show significant difference at  $P < 0.05$  level, and it is the same in following tables.

#### 2.4 不同灌水量处理对玉米产量及水分利用效率的影响

从玉米产量及水分利用效率(见表 3)来看, I<sub>225</sub> 处理玉米籽粒产量最高,达到  $13\ 568.47\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 相对于 I<sub>180</sub> 处理显著增产 11.46%, 相对于 I<sub>195</sub> 和 I<sub>210</sub> 也有明显增产趋势,分别增产 8.39% 和 8.53%。与产量结果不同, I<sub>180</sub> 处理水分利用效率最高,达到  $33.92\ \text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 相对于 I<sub>210</sub> 处理显著提高

10.9%, 相对于 I<sub>195</sub> 和 I<sub>225</sub> 处理也有增加趋势,分别增加 3.24% 和 5.60%, 但差异不显著。表明本试验条件下,灌水量从  $4\ 500\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  增加到  $4\ 725$ 、 $4950\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  时,产量并没有随着灌水量的增加而增加,但灌水量继续增加到  $5\ 175\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  时,水分利用效率没有明显降低的情况下,产量相对于 I<sub>180</sub>、I<sub>195</sub> 和 I<sub>210</sub> 处理明显增加 11.5%、8.39% 和 8.54%。

表 3 不同灌水处理下玉米产量和水分利用效率

Table 3 Yield and water use efficiency of maize under different amount treatments

处理 Treatments	产量 Yield /( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	播前期 0~110 cm 土层贮水量 0~110 cm soil water storage before seeding/mm	收获期 0~110 cm 土层贮水量 0~110 cm soil water storage at harvest/mm	水分利用效率 Water use efficiency /( $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
I <sub>180</sub>	12173.15b	316.22	297.33	33.92a
I <sub>195</sub>	12518.69ab	311.71	293.15	32.81ab
I <sub>210</sub>	12501.53ab	319.74	291.63	30.22b
I <sub>225</sub>	13568.47a	304.73	288.64	32.03ab

## 3 讨论

### 3.1 不同灌水量处理对玉米农田土壤水分的影响

土壤水分是影响作物生长发育及水分利用最主

要的环境因子<sup>[10]</sup>, 实现作物可持续高产高效, 不能只片面地追求作物产量, 更应该综合考虑土壤水分状况, 防止土壤水分逐年亏缺而出现土壤干化, 形成干土层<sup>[11]</sup>。本试验不同灌水量处理玉米播前期和

收获期 0~110 cm 土层具有相同的土壤含水率分布趋势,且收获期各处理 0~110 cm 贮水量没有出现明显差异,这主要可能是灌浆中后期玉米蒸腾作用降低,对土壤水分的吸收减弱,继续增加灌水量后土壤水分逐渐恢复,进而各处理土层贮水量没有出现明显差异。另外,本研究表明玉米在 7 月 16 日至 8 月 3 日为需水盛期,宜选择灌水量最高的  $I_{225}$  处理,8 月 26 日玉米灌浆后各处理对土壤水分的影响逐渐减弱,这与马兴祥<sup>[12]</sup>、王延宇<sup>[13]</sup>等的研究一致。因此,从土壤水分状况分析,本研究表明  $5\ 175\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  为该地区较为适宜的灌溉量,但灌浆中后期的最后一次灌水应考虑适当降低灌水量。

### 3.2 不同灌水量处理对玉米产量构成因素的影响

构成玉米产量的因素有很多,但穗部性状是其主要因素<sup>[14-15]</sup>,本试验表明不同灌水量处理对玉米株高和穗位高的影响不显著,但灌水量增加到  $5\ 175\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  时,玉米果穗长度显著增加,穗粒数和百粒重也有明显增加趋势,平均增加 4.88%、3.27% 和 4.31%,2011 年武威清源镇玉米灌水量试验也发现玉米果穗长和百粒重随着灌水量从  $3\ 750\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  增加到  $5\ 250\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  而呈增加趋势<sup>[16]</sup>,甘肃农业大学绿洲农业综合实验站试验也发现,随着灌水量从  $5\ 700\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  增加到  $7\ 200\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ,玉米穗粒数显著增加,粒重也明显增加<sup>[7]</sup>,中国农业大学石羊河流域农业与生态节水试验站玉米咸水非充分灌溉也试验表明,随着灌水量从 285 mm 增加到 480 mm 玉米穗粒数和百粒重显著增加<sup>[17]</sup>,与本结论基本一致。因此,石羊河流域玉米全膜垄作沟灌条件下,灌水量增加到一定程度后,可以明显增加其果穗长度、穗粒数和百粒重,进而增加籽粒产量。

### 3.3 不同灌水量处理对玉米产量和水分利用效率的影响

石羊河流域是我国水资源最为紧缺的地区之一,紧缺的水资源严重制约了农作物的高效和可持续发展,所以探索合理的农作物灌水量成为节约水资源和推动该地区农业高效和可持续发展的关键。本研究表明,在相同的灌水次数下,玉米灌水量从  $4\ 500\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  增加到  $4\ 725\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $4\ 950\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  时,产量并没有随着灌水量的增加而增加,但灌水量增加到  $5\ 175\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  的  $I_{225}$  处理时,水分利用效率没有明显降低的情况下,产量相对于  $I_{180}$ 、 $I_{195}$  和  $I_{210}$  处理明显增加了 11.5%、8.39% 和 8.53%。甘肃省武威市中心灌溉试验站玉米田间试验研究表

明在相同的灌水次数下,适当增加灌溉定额在一定程度上可增加作物产量和水分利用效率,但超过一定值之后,产量并无显著提高,相应水分利用效率也没有提高<sup>[18]</sup>。甘肃武威荒漠生态与农业气象试验站 2011 年田间试验发现,玉米灌水量从  $3\ 750\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  增加到  $4\ 500\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  时,籽粒增产 120.5%,灌水量增加到  $5\ 250\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  时,籽粒增产 286.0%,相应水分利用率也增加了 80.0% 和 157.0%<sup>[12]</sup>;甘肃民勤玉米田间试验发现,全膜双垄沟播灌水量从  $4\ 475.0\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  增加到  $5\ 187.5\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  时,籽粒产量几乎没有变化,但水分利用效率却降低了 13.2%<sup>[19]</sup>;而同样在西北干旱绿洲灌区,全膜覆盖玉米灌水量从 360 mm 增加到 480 mm 时,玉米产量降低了  $231\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,水分利用效率也降低了 23.2%<sup>[20]</sup>,均与本研究结论不一致,主要原因可能是各试验所设计的玉米种植方式、灌水时期、灌水分配、生育期和休闲期降雨量等因素的不同从而得出不同的产量和水分利用效率结果。综合考虑产量及水分利用效率,本研究认为  $5\ 175\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  为石羊河流域全膜垄作沟灌玉米较为适宜的灌水量,但应在长期定位的基础上,进一步考虑玉米的种植方式、灌水时期、灌水分配、土壤含水量等因素,从而推荐合理的灌水量。

## 4 结 论

综合考虑玉米产量、水分利用效率、产量构成因素及土壤含水率变化和土壤贮水量情况, $5\ 175\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  为石羊河流域玉米全膜垄作沟灌条件下的适宜灌溉量,但灌浆中后期的最后一次灌水应考虑适当降低灌水量。

### 参 考 文 献:

- [1] 李晓玲,刘普海,成自勇.不同灌溉方式下玉米节水增产效果试验研究[J].节水灌溉,2006,(3):7-9.
- [2] 彭世彰,朱成立.节水灌溉的作物需水量试验研究[J].灌溉排水学报,2003,22(2):21-25.
- [3] 苏培玺,杜明武,赵爱芬,等.荒漠绿洲主要作物及不同种植方式需水规律研究[J].干旱地区农业研究,2002,20(2):79-85.
- [4] 胡志桥,田霄鸿,张久东,等.石羊河流域主要作物的需水量及需水规律的研究[J].干旱地区农业研究,2011,29(3):1-6.
- [5] 马兴祥,陈雷,王鹤龄,等.灌水量对制种玉米干物质积累及产量性状的影响[J].中国农学通报,2014,30(9):180-185.
- [6] 张德奇,廖允成,贾志宽.旱区地膜覆盖技术的研究进展及发展前景[J].干旱地区农业研究,2005,23(1):208-213.
- [7] 于爱忠,柴强.供水与地膜覆盖对干旱灌区玉米产量的影响

- [J]. 作物学报, 2015, 41(5): 778-786.
- [8] 李尚忠, 樊廷录, 王勇, 等. 不同覆膜集雨种植方式对旱地玉米叶绿素荧光特性、产量和水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 458-466.
- [9] 李桂林, 王成兰, 陈其兵, 等. 覆膜方式对河西灌区玉米生长及产量的影响[J]. 甘肃农业科技, 2012, (1): 18-19.
- [10] 刘祖贵, 陈金平, 段爱旺, 等. 不同水分处理对夏玉米叶片光合等生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(1): 90-95.
- [11] 刘中奇, 朱清科, 秦伟, 等. 半干旱黄土区典型林地土壤水分消耗与补给动态研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(3): 36-40.
- [12] 马兴祥, 陈雷, 丁文魁, 等. 灌水量和气温对玉米生物耗水及产量的影响[J]. 干旱气象, 2014, 32(4): 521-526.
- [13] 王延宇, 王鑫, 赵淑梅, 等. 玉米各生育期土壤水分与产量关系的研究[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(1): 100-105.
- [14] 刘帆, 石海春, 余学杰. 玉米果穗主要性状与产量间的相关与通径分析[J]. 玉米科学, 2005, 13(3): 17-20.
- [15] 任小龙, 贾志宽, 韩清芳, 等. 半干旱区模拟降雨下沟垄集雨种植对夏玉米生产影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 45-50.
- [16] 马兴祥, 陈雷, 王鹤龄, 等. 灌水量对制种玉米干物质积累及产量性状的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(9): 180-185.
- [17] 蒋静, 冯绍元, 孙振华, 等. 咸水非充分灌溉对土壤水盐分布及玉米产量的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2637-2642.
- [18] 刘玉洁, 李援农, 潘韬, 等. 不同灌溉制度对覆膜春玉米的耗水规律及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 67-72.
- [19] 王绍美, 金胜利, 王刚. 河西灌区全膜双垄沟播玉米的节灌增产效应[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(5): 40-45.
- [20] 樊廷录, 杨珍, 王建华, 等. 灌水时期和灌水量对甘肃河西玉米制种产量和水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 1-6.

(上接第 190 页)

#### 参考文献:

- [1] 李建宏. 干渠渠段输水损失测算分析[J]. 宁夏农学院学报, 2002, (4): 50-52.
- [2] 任可, 王红雨. 灌区输水渠道渗漏损失测算与分析[J]. 中国农村水利水电, 2006, (12): 16-20.
- [3] 刘战. 灌溉水利用系数的影响因素及提高措施[J]. 陕西水利, 2009, (4): 136-139.
- [4] James W Kirchner. Statistical inevitability of horton's laws and the apparent randomness of stream channel networks[J]. Geology, 1993, 21(7): 591-594.
- [5] 杨太华, 苏维疏, 何凡铎. 黔南曹渡河流域水系的分形分维研究[J]. 贵州科学, 1992, 10(1): 60-66.
- [6] 张宏才. 水系分形研究的若干思考[J]. 咸阳师范学院学报, 2003, 18(6): 41-43.
- [7] 陈彦光, 李宝林. 吉林省水系构成的分形研究[J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 178-184.
- [8] 王卫红, 徐鹏, 田世民. 分形理论在河型研究中的应用探讨[J]. 泥沙研究, 2010, (2): 35-41.
- [9] 杨秀春, 李晓华. 中国七大流域水系与洪涝的分维及其关系研究[J]. 灾害学, 2002, 17(3): 9-13.
- [10] 贺军奇, 吴普特, 汪有科, 等. 渠道密度与渠系水利用系数关系研究[J]. 中国农村水利水电, 2007, (2): 17-18.
- [11] 王小军, 张强, 古璇清. 基于分形理论的灌溉水有效利用系数空间尺度变异[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1201-1212.
- [12] 王小军, 张强, 易小兵, 等. 灌区渠系特征与灌溉水利用系数的 Horton 分维[J]. 地理研究, 2014, 33(4): 789-800.
- [13] 刘丙军, 邵东国, 沈新平. 灌区灌溉渠系分形特征研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 56-59.
- [14] 屈忠义, 杨晓, 黄永江, 等. 基于 Horton 分形的河套灌区渠系水利用效率分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 120-127.
- [15] Turcotte D L. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [16] Batty M. Physical phenomena[J]. Geographical Magazine, 1992, (7): 35-36.
- [17] La Barbera P, Rosso R. On the fractal dimension of stream networks[J]. Water Resources Research, 1989, 25(4): 735-741.
- [18] Schuller D J, Rao A P. Fractal characteristics of dense stream networks[J]. Journal of Hydrology, 2001, 243: 1-16.
- [19] 谢先红, 崔远来, 蔡学良. 灌区塘堰分布分形描述[J]. 水科学进展, 2007, 18(6): 858-863.
- [20] 李圆玥, 高华瑞, 罗忠志. 贵州省典型喀斯特地区地表水系结构特征研究[J]. 中国水土保持, 2015, (5): 43-46.
- [21] 龙腾文, 赵景波. 基于 DEM 的黄土高原典型流域水系分形特征研究[J]. 地球与环境, 2008, 36(4): 304-307.