

根系分区交替滴灌对棉花产量和水分利用效率的影响

杜太生¹, 康绍忠^{1,2}, 胡笑涛², 杨秀英³

(¹ 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083; ² 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100;

³ 甘肃省武威市水利科学研究所, 武威 733000)

摘要: 为了探讨旱区农业节水新途径, 在甘肃省石羊河流域下游荒漠绿洲区采用常规滴灌和分根区交替滴灌方式研究不同灌溉方式对大田棉花生长发育、产量、水分利用效率以及土壤水分分布的影响。结果表明, 交替滴灌处理棉花叶片气孔开度减小, 减少了奢侈的蒸腾损失, 灌溉定额较小时根系分区交替滴灌对棉花的株高抑制作用较明显, 灌溉定额较大时限制作用不显著。根系分区交替滴灌技术在大田条件下可使籽棉产量比常规滴灌处理提高 21.1%, 总水分利用效率和灌溉水利用效率分别提高 17.9% 和 20.9%。同等产量水平下与常规滴灌相比, 交替滴灌可节省 30.8% 的灌水量。本研究表明根系分区交替滴灌是一种切实可行的节水灌溉技术, 可在干旱缺水的棉花生产地区进一步研究和推广应用。

关键词: 棉花; 滴灌; 分根交替灌溉; 产量; 水分利用效率

Effect of Alternate Partial Root-Zone Drip Irrigation on Yield and Water Use Efficiency of Cotton

DU Tai-sheng¹, KANG Shao-zhong^{1,2}, HU Xiao-tao², YANG Xiu-ying³

(¹The Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083; ²Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semi-Arid Areas of Ministry, Education, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100; ³Wuwei Institute of Water Conservancy, Wuwei 733000)

Abstract: A field experiment was conducted in the oasis region of Shiyang River basin, Gansu Province to research the effect of alternate partial root-zone drip irrigation (ADI) and conventional drip irrigation (CDI) on soil water distribution, cotton growth, yield and water use efficiency (WUE). The results showed that ADI provided smaller stomata opening to reduce the useless luxury transpiration loss, the height of cotton under ADI was restricted under low irrigation level, but not significant under high level. Results showed that compared with CDI, seed cotton yield under ADI increased by 21.1% with total water use efficiency and irrigation water use efficiency being improved by 17.9% and 20.9%, respectively. Results also showed that seed cotton yield under ADI had no significant difference with 30.8% water being saved. It suggested that ADI is a practiced irrigation method which should be researched and applied in cotton producing of arid areas.

Key words: Cotton; Drip irrigation; Alternate partial root-zone irrigation; Yield; Water use efficiency

甘肃石羊河流域下游位于巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠之间。光照资源丰富而降雨稀少, 属于典型的灌溉农业区域, 尤其地处下游的民勤县更是一个典型的“沙海孤岛”。2004 年 6 月由于降雨稀少使石羊河下游水量减少, 该县唯一的地表水源红崖山水库干涸见底。为了生产生活只能抽取 80~300 m 深层的地下水,

致使地下水位逐年下降, 沙生植被枯萎死亡, 沙尘暴肆虐, 生态环境恶化。同时民勤又是河西农业主产区, 小麦、玉米等粮食作物和棉花、葡萄、籽瓜等经济作物种植面积很大, 农业与生态用水矛盾日益突出。近年来, 棉花成为该县调整种植结构中发展的一项支柱产业。当地群众将这一调整称为“银色革命”。该县棉

收稿日期: 2005-04-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50339030)、国家“十五”节水农业重大科技专项 (2002AA2Z-4041)

作者简介: 杜太生 (1975-), 男, 山东东阿人, 博士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。Tel: 010-62737611; E-mail: dts1975@126.com。
康绍忠为通讯作者, Tel: 010-62737611; E-mail: kangshaozhong@tom.com

花已成为提高农民收入的主要经济作物。因此如何高效利用有限的水资源进行灌溉是当地棉花生产中的一个重要课题。

大量研究表明,利用改变根区土壤湿润方式来有效刺激根区土壤水分有效性、根系吸收功能及其补偿效应、根源信号传递与气孔最优调节,改进作物水分利用效率具有较大的潜力和可能性^[1~3]。控制性根系分区交替灌溉(CAPRI)是在植物某些生育期或全部生育期交替对部分根区进行正常的灌溉,其余根区则受到人为的水分胁迫的灌溉方式,是常规灌溉思路的新突破,目前已在葡萄、苹果、梨和玉米等作物上进行了研究和应用^[3,4]。但在棉花上还未见有关应用报道。为了研究这种新的节水灌溉技术在棉花上的应用模式和节水潜力,本文研究了根系分区交替滴灌对棉花生长发育、土壤水分分布、水分生理指标、产量和水分利用效率的影响,以为棉花根系分区交替灌溉技术的应用和推广提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验概况

试验于2004年4~10月在甘肃省民勤县农业技术推广中心试验站(38°30'N, 103°30'E)进行。该区海拔1340 m,属温带大陆性干旱气候,多年平均降水量110 mm左右,且多为5 mm以下的无效降水,7~9月的降水占全年降水的60%,年蒸发量2644 mm,日照时数>3010 h, >10°C积温3147.8°C。地下水埋深13~18 m。1 m土层内土质均为砂壤土,0~60 cm土层含少量腐殖质和粘粒,粒径0.5~2.0 mm。60~100 cm土层内土壤颜色变深,粘粒增多,土质不匀,有少量夹层黄沙,呈黄色透镜体,胶泥质夹杂少量腐殖质。1 m土层内含盐量<0.4%,容重1.52~1.54 g·cm⁻³,田间持水量为33.7%~36.2%(土壤体积含水量)。1 m土层内土壤养分含量差异较小,有机质含量8 g·kg⁻¹,全氮含量0.55 g·kg⁻¹,速效磷平均含量175 mg·kg⁻¹,速效钾为150~200 mg·kg⁻¹。按当地种植习惯,为了储水压盐,棉花种植前于冬季进行储水灌溉,灌水定额为1050 m³·ha⁻¹,棉花播前灌水为750 m³·ha⁻¹,播种时初始含水量为33.5%。

1.2 试验设计

以棉花(品种为新陆早7号)为试验材料,种植方式为一膜4行,膜宽120 cm,膜间距20 cm。棉花行距30 cm,株距25 cm,每穴留健壮棉苗2~3株,保苗密度19.2万株/ha,滴灌系统采用内镶式薄壁滴灌

带,以“一带两行”(一条滴灌带控制两行作物)方式布设毛管。交替滴灌处理每次灌溉前仅打开一侧的毛管供水,而另一侧关闭;下一次灌水时上次灌水的毛管关闭,而上次关闭的本次打开,使植株两侧的土壤交替湿润,利用放苗孔或打孔进行膜上滴灌。各小区随机布设,以滴灌时间控制流量。试验设交替滴灌(ADI)、常规滴灌(CDI)两种灌水方式。本年度试验棉花共滴灌4次,灌溉时间分别为6月18日、7月10日、7月30日、8月9日。次灌水定额设150、225、300 m³·ha⁻¹3个灌水水平,相应处理分别表示为:ADI-1、ADI-2、ADI-3; CDI-1、CDI-2、CDI-3。各处理3次重复,小区长11 m,宽2.6 m,每个小区布设4条毛管。灌水量由灌水软管末端的水表控制,各处理锄草、施肥、化控、催熟等田间管理措施均保持一致。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 常规气象资料 用便携式自动气象站(Hobo Weather Station, U.S.A)观测试验期间降雨量、太阳辐射、风速、露点温度、平均温度、相对湿度等气象资料。

1.3.2 土壤含水率 在棉花全生育期内每3~5 d用土壤水分廓线仪(Diviner2000, Sentek Pty Ltd, Australia)测定土壤含水率变化,测管布设位置见图1。

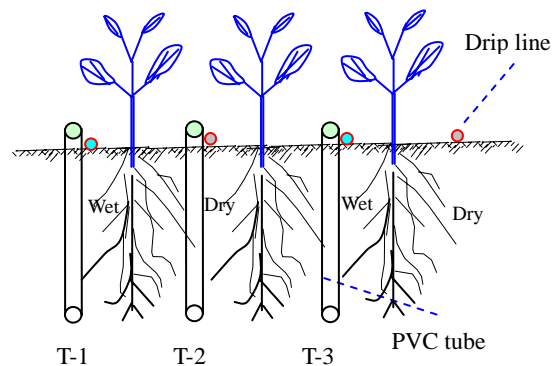


图1 棉花根系分区交替滴灌布设示意图

Fig. 1 Layout of alternate partial root zone drip irrigation on cotton

1.3.3 生理指标测定 用Lci便携式光合作用测定系统(Lci Portable Photosynthesis System, ADC BioScientific Ltd., England)测定各处理顶部完全展开叶的光合速率、蒸腾速率和气孔导度等指标,各处理均随机选择3株进行测定,单叶水分利用效率(WUE)用叶片通过蒸腾消耗一定量的水(mmol·m⁻²·s⁻¹)所同化的CO₂量(μmol·m⁻²·s⁻¹)来表示,即WUE=P_n/T_r。

1.3.4 收获考种、田间测产与棉田耗水量计算 试验结束时各处理随机取 6 株进行考种, 测定地上、地下部分的干物质量、绒长、衣分等指标; 各小区单收单打计产, 籽棉、皮棉产量以实收产量测算。不同处理棉田耗水量由水量平衡公式计算:

$$ET_c = R + I - F \pm Q + \Delta W \quad (1)$$

式中, ET_c 为作物蒸发蒸腾量, R 为降水量, I 为灌水量, F 为地表径流, 考虑到滴灌棉田试验期间无地表径流发生, 此处取 $F=0$, Q 为上移或下渗量, 根据预试验资料, 最大灌水定额 ($300 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) 下土壤最大湿润深度为 $40 \sim 50 \text{ cm}$, 实测资料也表明 1 m 深度处土壤水分变化不明显, 因此取 $Q=0$; ΔW 为土壤贮水量的减少量, 由 Diviner 土壤水分廓线仪测定的土壤含水量求得:

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n (W_{1i} - W_{2i}) \quad (2)$$

式中, i 为土壤层次, n 为土壤层次总数目。Diviner 土壤水分廓线仪测定的含水率为每 10 cm 一层次的体积含水率, 测定深度为 100 cm , 因此 n 值为 10 。

为方便水量平衡计算, 将体积含水率换算为以 mm 为单位的土壤含水量 W :

$$W = \theta h / 10 \quad (3)$$

式中, W 为以 mm 为单位的土壤含水量, θ 为土壤体积分含水率 (%), h 为土层厚度 (cm)。

考虑到滴灌条件下土壤水分含量并非一维的层状分布, 尤其在根系分区交替滴灌的特殊条件下更是存在着明显的干湿区域。Diviner2000 土壤水分廓线仪的测定影响半径为 10 cm , PVC 管直径为 5 cm , 而棉花行距 30 cm , 因此 T-1、T-2 和 T-3 三根测管可分别近似代表膜间和相对干、湿区域土壤水分的平均状况。设某层次 T-1、T-2 和 T-3 三根测管土壤体积分含水率测定值分别为 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 , 而膜间: 干燥区: 湿润区面积比例为 $1:3:3$, 则棉田总体平均含水率:

$$\theta = (\theta_1 + 3\theta_2 + 3\theta_3) / 7 \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 气象条件

棉花各生育阶段的平均气温、降雨和参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 如表 1 所示。2004 年棉花全生育期降雨量为 118 mm , 其中次降雨量在 5 mm 以上的为 83.2 mm , 属干旱偏湿年份。试验期间日均气温 $>10^\circ\text{C}$ 的积温为 $2\ 828.51^\circ\text{C}$, 棉花全生育期平均 ET_0 为 $4.25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 降雨主要集中在盛花期和铃期。

表 1 覆膜滴灌棉花各生育阶段积温和降雨情况

Table 1 Accumulative temperature and rainfall at different growth stages of cotton under mulched drip irrigation

生育期 Growth stages	苗期 Seedling	现蕾期 Bud emergence	初花期 Early flowering	盛花期 Full flowering	铃期 Bolling	吐絮期 Boll opening	全生育期 Whole stages
起讫日期 Date	5.10~6.15	6.16~7.5	7.6~7.14	7.15~8.3	8.4~9.20	9.21~10.20	5.10~10.20
天数 Day (d)	36	20	9	20	48	33	166
>10°C 积温	604.68	435.44	203.63	448.68	893.77	242.31	2828.51
>10°C accumulative temperature (°C)							
有效降雨 Effective rainfall (mm)	12	0	0	45	26.2	0	83.2
平均蒸发蒸腾 Average potential evapotranspiration (mm·d ⁻¹)	4.13	4.45	5.18	5.57	4.23	3.19	4.25

2.2 土壤水分动态变化

次灌水定额为 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 的两种滴灌模式下棉花全生育期 $0 \sim 60 \text{ cm}$ 土层土壤水分的变化过程如图 2 所示。由图中可见, 即使在灌水区与非灌水区之间存在着土壤水分的交换, 在棉花整个生长期内灌水区与

非灌水区之间仍然存在着水势梯度。对于交替滴灌 (ADI) 处理, 灌水区与非灌水区之间存在干湿交替的过程, 因此, 其两侧土壤水分变化呈现交替上升和下降的现象。对于常规滴灌 (CDI) 处理, 两部分根区之间土壤水分始终保持在同一水平。

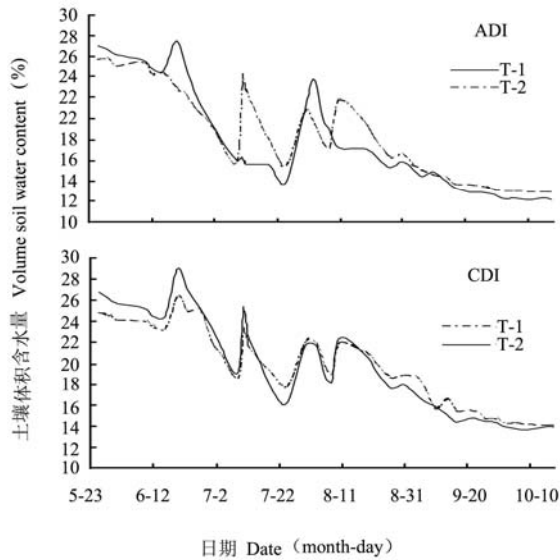


图 2 交替滴灌和常规滴灌条件下不同根区土壤水分动态变化

Fig. 2 Temporal variation of soil moisture in different root zones under ADI and CDI

以第二次灌水(2004年7月10日)为例,图3表示次灌水定额为 $300\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ 时交替滴灌条件下不同根区区域土壤水分垂直向动态变化情况。由图中可见,本试验条件下滴灌最大湿润深度为40 cm,灌水后,灌水区域的土壤水分迅速升高,同时非灌水区0~30

cm 土壤含水率因产生侧渗也有所升高,但体积含水率均未超过 20%。随着土壤水分的消耗,ADI 灌水区与非灌水区之间的土壤水分差值逐渐缩小,至 7 月 24 日时两部分根区土壤水分已相当接近,此后于 7 月 30 日进行交替,使干燥区域复水,上次湿润的区域进入干燥处理。从而使作物根系一部分处于土壤含水率较高的湿润区,而另一部分处于相对干燥的区域区,两种情况交替出现。

2.3 不同灌溉模式下棉花株高变化

株高增长快慢是衡量棉株生育状况的一个重要指标。棉花不同生育阶段株高日增长量大小直接反映营养生长和生殖生长的协调程度,适宜的株高有利于株型改善,使冠层分布合理。试验观测的不同灌水模式下棉花株高变化情况(图4)表明,相同灌水方式条件下,株高随总灌水量的增加而增加,灌水方式对棉花株高的影响明显小于灌水定额的影响。次灌水定额为 $150\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ 时,交替滴灌处理的株高明显低于常规滴灌的处理,说明在少量灌水条件下 ADI 产生较强的干旱胁迫,限制了棉株的生长。当次灌水定额增加到 $225\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ 时,交替滴灌和常规滴灌棉花的株高已无显著差异。随着灌水量的增加, $300\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ 的次灌水定额使交替滴灌的棉花株高甚至超过了常规滴灌。

2.4 交替滴灌对棉花叶片光合、蒸腾和水分利用的影响

试验中连续 5 次于每日 8:00~10:00 测定了不同

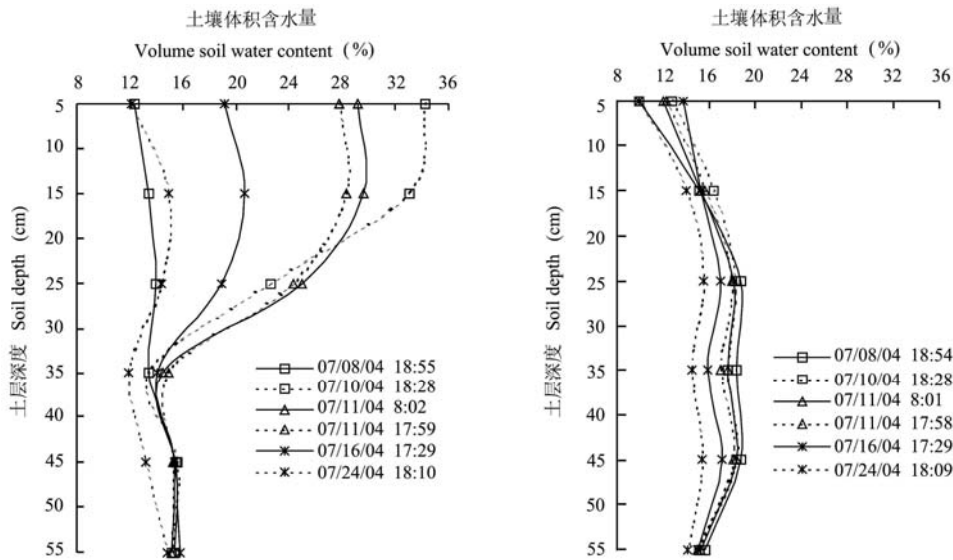


图 3 交替滴灌条件下不同根区土壤水分垂直向动态变化

Fig. 3 Spatial variation of soil moisture of different root zone under ADI

滴灌方式下棉花叶片光合、蒸腾速率和气孔导度等指标,以次灌水定额 $225 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 的 ADI-2 和 CDI-2 为例,测定结果列于表 2。

由表 2 可见,常规滴灌 CDI 处理的叶片光合速率和蒸腾速率均高于 ADI 处理,但这种较高的光合速率是以更多的水分消耗为代价的,其水分利用效率一直

处于较低的水平,交替滴灌处理的平均水分利用效率显著高于常规滴灌处理。同时 ADI 处理的棉花始终有一部分根系处于相对干燥状态,干旱区域的根系所感知的干旱信号传递至地上部,使气孔导度降低(表 2),气孔开度减小,减少了水分的无效散失。从而大大提高了水分利用效率^[2]。

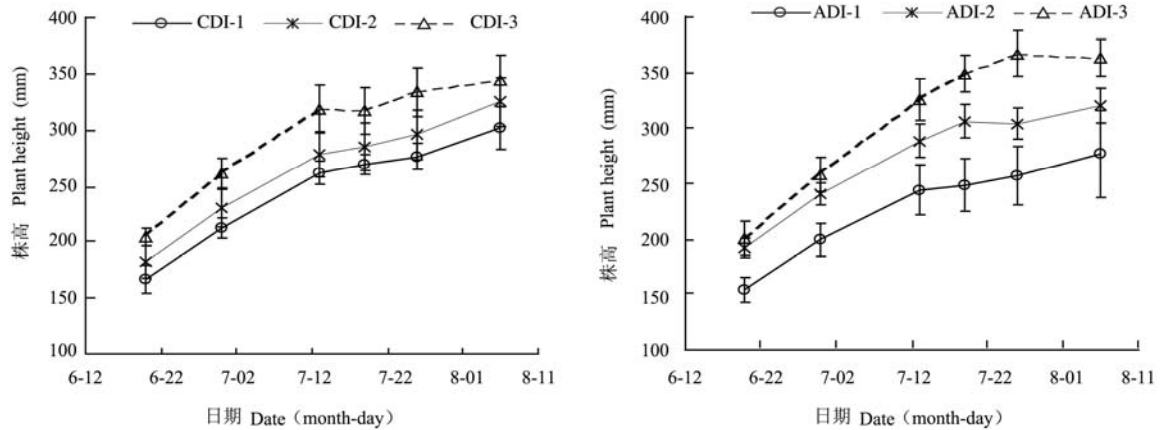


图 4 根区不同灌水方式条件下棉花株高的变化

Fig. 4 Temporal variation of cotton plant height under ADI and CDI

表 2 交替滴灌和常规滴灌方式下棉花叶片光合速率、蒸腾速率与水分利用效率

Table 2 Photosynthetic rate, transpiration rate and water use efficiency of cotton leaf under ADI and CDI

测定指标 Physiological index	处理 Treatment	测定时间 Time (month-day)					平均 Mean
		8-1	8-2	8-3	8-4	8-5	
光合速率	ADI-2	18.95	18.25	19.30	23.89	13.92	18.86 a
P_n ($\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	CDI-2	20.58	18.19	24.54	24.82	13.66	20.36 a
蒸腾速率	ADI-2	6.71	6.08	5.13	5.09	3.74	5.35 a
T_r ($\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	CDI-2	7.38	7.17	6.65	5.41	4.38	6.20 a
气孔导度	ADI-2	0.39	0.46	0.40	0.52	0.31	0.42 a
g_s ($\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	CDI-2	0.49	0.52	0.52	0.53	0.43	0.50 a
水分利用效率 WUE ($\mu\text{molCO}_2 / \text{mmolH}_2\text{O}$)	ADI-2	2.84	3.00	3.74	4.66	3.72	3.59 a
	CDI-2	2.77	2.54	3.69	4.56	3.12	3.34 b

表中数据均为相同位置叶片 5 次测定的平均值。字母 a、b 表示同列相同测定指标在 $P < 0.01$ 水平下显著。表 4 同

The data in the table is average of 5 measurements of leaves at the same position. a, b, c represent statistic significance at level of 0.05. The same as Table 4

2.5 交替滴灌对棉花产量和水分利用效率的影响

棉花考种结果(表 3)表明,不同处理间的铃重、绒长、单株籽棉、单株皮棉、衣分等指标均无显著差异。当次灌水定额为 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 时,与常规滴灌相比,交替滴灌处理的株高较小,但单株果枝数和铃数均大于常规滴灌处理,这表明在较小灌溉水量情况下局部根区供水产生了较强的水分胁迫,棉株的营养生长受

到抑制,而生殖生长并未受到显著影响甚至还优于全部根区供水的处理。当灌溉定额增至 $225 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 时,交替滴灌处理的株高和单株果枝数略小于常规滴灌,而单株铃数无显著差异。随着灌溉定额的加大,各灌水方式指标间的差异加大,交替滴灌的株高超过了常规滴灌,其单株铃数、单株果枝数也显著高于常规滴灌处理。

表 4 列出了两种灌水方式对棉花产量和水分利用效率的影响, 数据显示在相同灌水量情况下, 交替滴灌的籽棉产量以及灌溉水利用效率均高于常规滴灌的处理, 两种灌水方式下籽棉产量均随灌水量的增大而提高。总体来看, 次灌水定额为 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 的 ADI 处理产量最高, 当次灌水定额由 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 下降到 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 时, 与常规滴灌相比, 交替滴灌可以在保持同等产量的前提下使灌水定额减少 1/2, 使灌溉水利用效率提高 40%; 而当次灌水量分别为 300、225、 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 时, 与同等灌水水平的常规滴灌相比, 交替滴灌处理的产量可分别提高 21.1%、22.5%、10.21%。

从表 4 中还可看出, 交替滴灌和常规滴灌两种灌水方式对棉花的地上部分生长和根系分布的影响较

小。当次灌水量为 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 时, 由于灌水量相对较小, 而且交替滴灌处理只有一部分区域湿润, 其地上和地下部分的生长均受到了抑制, 根系干重和根冠比减小, 当次灌水量增大到 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 时, 交替滴灌的干燥部分根区水分含量由于侧向入渗得到一些补充, 抑制作用减弱, 根系的补偿生长效应得到触发, 根系的生长量反而超过了常规滴灌的处理, 单株根条数平均比常规滴灌多出 2.86 条, 使根系吸收到更多的水分和养分供应地上部分生长, 根冠比也显著高于常规滴灌。当次灌水定额为 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 时, 常规滴灌的单株地上部干物重远远大于交替滴灌, 但其籽棉产量却显著低于交替滴灌处理。

表 3 不同滴灌模式条件下棉花产量构成指标

Table 3 Yield component of cotton under different drip irrigation

灌溉方式 Irrigation method	次灌水定额 Water amount per irrigation ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)	株高 Plant height (mm)	单株果枝数 No. of fruit branches per plant	单株铃数 No. of bolls per plant	铃重 Boll weight (g)	绒长 Fiber length (mm)	单株籽棉 Weight of seed cotton per plant (g/plant)	单株皮棉 Lint yield per plant (g/plant)	衣分 Lint percentage (%)
ADI-1	150.0	354.0b	6.13abc	5.07b	6.48a	41.00a	5.07a	2.03a	39.34a
CDI-1	150.0	378.7ab	5.00c	3.87c	6.75a	40.87a	4.55a	1.83a	40.18a
ADI-2	225.0	359.3b	6.00abc	4.67bc	6.91a	41.20a	4.76a	1.89a	35.43a
CDI-2	225.0	413.3ab	5.53bc	4.27bc	6.59a	37.20a	4.72a	1.88a	40.00a
ADI-3	300.0	434.0a	7.07a	6.20a	6.55a	40.53a	4.68a	1.93a	38.57a
CDI-3	300.0	407.3ab	6.40ab	4.67bc	6.55a	40.13a	4.53a	1.75a	41.41a

字母 a、b、c 表示同一列在 $P_{0.05}$ 水平上显著

a, b, c represent statistic significance at level of 0.05

表 4 不同滴灌模式下棉花根系生长量、产量与水分利用效率

Table 4 Root growth, yield and water use efficiency of cotton under different drip irrigation

灌水方式 Irrigation method	次灌水定额 Water amount per irrigation ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)	耗水量 Total water consumed (mm)	单株根条数 No. of roots per plant	单株地上部干物重 Shoot dry mass per plant (g/plant)	单株根系干重 Root dry mass per plant (g)	根冠比 Root-shoot ratio	籽棉产量 Seed cotton yield ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)	WUE_{ET} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	WUE_I ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
ADI-1	150.0	338.91b	9.93a	36.35b	3.03b	0.0889bc	2037.03b	0.59bc	1.54a
CDI-1	150.0	358.14a	8.06a	35.65b	3.66ab	0.1058ab	1848.35c	0.49c	1.40b
ADI-2	225.0	353.10a	7.60a	35.27b	3.09b	0.0947bc	2301.76ab	0.76a	1.43b
CDI-2	225.0	330.08b	8.79a	37.99b	4.53a	0.1242a	1878.82c	0.57bc	1.17c
ADI-3	300.0	364.02a	10.93a	39.23b	4.55a	0.1153ab	2524.93a	0.66ab	1.33bc
CDI-3	300.0	379.07a	8.07a	54.02a	3.78ab	0.0729c	2084.90b	0.56bc	1.10c

WUE_{ET} 和 WUE_I 分别表示总水分利用效率和灌溉水利用效率, $WUE_{ET} = Y / ET_c$, $WUE_I = Y / I$ 。其中 Y 为籽棉产量, ET_c 为由公式 (1) 计算出的田间实际耗水量, I 为实际灌水量

WUE_{ET} is calculated as seed cotton yield per total water use, and WUE_I is calculated as seed cotton yield per total irrigation water from the following equations: $WUE_{ET} = Y / ET_c$, $WUE_I = Y / I$. Where ET_c is total amount of water consumed in the field, which can be calculated from equation (1), Y is seed cotton yield

3 讨论

如何在空间上主动的改变水分供应方式, 刺激根系补偿生长功能, 调控地上部生长过程和光合作用,

已经成为植物生理科学和灌溉科学的热点问题。根系分区交替灌溉技术在国外一般称为部分根区干燥技术 (partial rootzone drying, PRD), PRD 技术起源于植物生理学家对传统的分根试验和根源干旱信号的探

索, 后来又发展为干湿交替供水, 但没有作为一种灌溉方式进行深入研究。在国内康绍忠等^[3-5]于 1996 年系统提出了控制性根系分区交替灌溉理论, 阐明了其概念、理论基础和实现方式, 并在节水机理、室内盆栽、试验小区、大田应用等方面开展了系统深入的研究。笔者在大田玉米上进行的隔沟交替灌溉试验结果表明^[4], 隔沟交替灌溉方式下灌溉水利用效率明显增加, 达 $2\ 198\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上, 总灌水量可由 $315\ \text{mm}$ 下降到 $210\ \text{mm}$, 甚至 $157.5\ \text{mm}$ 而产量没有明显下降。贾宏涛等^[6]在新疆针对覆膜棉花进行了膜下交替沟灌技术的研究和探讨, 研究发现棉花膜下控制性分根交替灌溉在产量基本不降低的情况下, 比全面均匀供水方式节水 $33\%\sim 70\%$ 。笔者在石羊河流域下游荒漠绿洲区进行的棉花根系分区交替滴灌试验结果则表明, 同等灌水水平下交替滴灌棉花的籽棉产量、总水分利用效率和灌溉水利用效率均显著高于常规滴灌处理; 次灌水定额 $300\ \text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$, 滴灌 4 次的交替滴灌处理籽棉产量比常规滴灌处理籽棉产量提高了 21.1% , 总水分利用效率和灌溉水利用效率分别提高 17.9% 和 20.9% ; 同等产量水平下与常规滴灌相比, 交替滴灌可使总灌水量减少 30.8% 。试验结果初步表明根系分区交替灌溉技术在棉花上具有同样的节水增产潜力。

张建华等^[7]通过分根试验研究发现控制部分根区干燥能提高植物水分利用效率, 而光合速率和生物量下降并不显著。武永军等^[8]则认为分根区干湿交替可使玉米蒸腾速率明显下降, 而光合速率变化不明显。笔者在温室内进行的研究也表明, 部分根区交替供水降低了棉花叶片蒸腾速率, 而光合速率并没有下降, 气孔导度略有下降, 无效的水分消耗减少, 从而提高了水分利用效率。以上结论都是在实验室内和温室内得到的, 较好的控制条件剔除了其它因素的影响, 本研究发现根系分区交替灌溉降低了叶片气孔导度, 这与很多研究是一致的^[1,2,4,8]。但光合速率与蒸腾速率测定结果却表明, 根系分区交替灌溉使棉花叶片光合速率、蒸腾速率均有所降低, 而叶片总体水分利用效率仍明显提高。笔者认为可能是测定时光照条件、风速、气温等气象条件的变化造成的。试验结果还表明交替滴灌可以主动调控不同根区的水分状况, 使作物的一部分根系处于土壤含水率较高的湿润区, 而另一部分处于干燥区, 使干燥区域根系水分胁迫后合成的 ABA 随蒸腾流运至地上部, 促使气孔关闭, 使叶片气孔导度下降, 从而减少“奢侈”的蒸腾损失, 使水分利用效率大大提高。这在大田条件下验证了 Blackman 和

Davies 等人提出的根冠通讯理论的正确性, 证实了其在农业节水中应用的巨大潜力。

肖俊夫等^[9]在温室内滴灌条件下的研究结果表明, 棉花的株高随供水量的增加而增加。本试验在相同灌水方式下也得出了类似的规律。但由于本试验在大田条件下, 生态因素较复杂, 其它指标随灌水量的变化并未表现出类似趋势。这一方面是因为灌水量之间差距较小和试验取样误差造成的, 另一方面也是棉花自身的生理调节和补偿生长作用的结果。大量研究表明, 作物在水分胁迫解除后存在一个短暂的快速生长, 可部分补偿胁迫造成的损失, 作物干旱复水后引起的生长反应可称为补偿生长效应^[10,11]。本研究发现在次灌水定额 $300\ \text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ 水平下, 交替滴灌的棉花株高超过了常规滴灌, 说明交替滴灌造成的根系区域的干湿交替使棉花植株产生了补偿生长效应, 其原因是交替灌溉条件下始终有一部分根系处于水分胁迫状态, 这部分根系产生的干燥信号使植株产生的补偿生长效应抵消了干旱胁迫对株高的限制影响。

有关生长冗余与农作物产量之间的关系及其在农业生产中应用的研究^[12]表明, 适当减少生长冗余可以增产, 但这种定性结果对于指导农作物高效优质生产的可操作性仍然较差。本研究结果表明, 交替滴灌棉花叶片尽管光合速率有所下降, 但籽棉产量却有显著的增加, 尤其是当次灌水定额为 $300\ \text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ 时, 常规滴灌的单株地上部干物重远远大于交替滴灌, 但其籽棉产量却显著低于交替滴灌处理。笔者认为其原因是交替滴灌提高了光合产物向籽棉产量的转化效率, 减少了棉花营养器官的生长冗余。是否交替滴灌可以作为抑制棉花生长冗余, 调节光合产物向产量的转化效率的一种田间调控模式? 对这一理论问题还需进行深入的研究。

本试验是在荒漠绿洲区大田条件下进行的, 不可避免的受到气象条件和土壤物理特性变异等因素的限制, 笔者正在对其进行系统连续的试验研究以排除其它因素的影响。另外, 本试验采用的是人工移动毛管的交替方式, 也可在每条毛管出口处安装自动或手动控制阀门, 实现交替供水。笔者正在研究控制毛管交替供水的自动控制器和双腔毛管等设备, 以期为这项技术的推广应用提供硬件支持。

4 结论

根系分区交替滴灌技术在大田条件下是适用的, 可使籽棉产量比常规滴灌处理提高 21.1% , 总水分利

用效率和灌溉水利用效率分别提高 17.9%和 20.9%；同等产量水平下与常规滴灌相比，交替滴灌可节省 30.8%的灌水量而不引起产量的下降，作物单叶水分利用效率；总水分利用效率和灌溉水利用效率明显增加。本试验表明交替滴灌能刺激棉花根冠产生补偿生长效应，提高光合产物向籽棉产量的转化效率；减少“奢侈”的蒸腾损失，使水分利用效率大大提高。初步证明这种新的灌溉技术能在保持棉花产量不降低的情况下幅度节水，显著提高水分利用效率。该技术在水资源短缺地区尤其是荒漠绿洲区具有广阔的应用前景。

致谢：甘肃省武威市水利科学研究所张霖、王兴成，甘肃省民勤县农业技术推广中心唐青云等参加了田间试验工作，谨表示衷心的感谢。

References

- [1] Davies W J, Bacon M A, Thompson D S. Regulation of leaf and fruit growth in plants growing in drying soil: exploitation of the plants' chemical signalling system and hydraulic architecture to increase the efficiency of water use in agriculture. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(350): 1 617-1 626.
- [2] Davies W J, Wilkinson S, Loveys B. Stomatal control by chemical signaling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New Phytologist*, 2002, 153: 449-460.
- [3] Kang S Z, Zhang J H. Controlled alternate partial rootzone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(407): 2 437-2 446.
- [4] 梁宗锁, 康绍忠, 石培泽, 潘英华, 何立绩. 控制性分根交替灌水对作物水分利用率的影响及节水效应. *中国农业科学*, 1998, 31(5): 88 - 90.
Liang Z S, Kang S Z, Shi P Z, Pan Y H, He L J. Effect on water use efficiency and water-saving by controlled root-divided alternative irrigation. *Scientia Agricultura Sinica*, 1998, 31(5): 88-90. (in Chinese)
- [5] 潘英华, 康绍忠, 杜太生, 杨秀英. 交替隔沟灌溉土壤水分时空分布与灌水均匀性研究. *中国农业科学*, 2002, 35 (5): 531 -535.
Pan Y H, Kang S Z, Du T S, Yang X Y. Soil water distribution and irrigation uniformity of alternative furrow irrigation. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35 (5): 531-535. (in Chinese)
- [6] 贾宏涛, 罗立权, 苏 刚. 新疆棉花膜下交替沟灌技术的可行性探讨. *中国棉花*, 2003, 30 (7): 8-9.
Jia H T, Luo L Q, Su G. Discuss on feasibility of alternate furrow irrigation under mulch in Xinjiang. *Chinese Cotton*, 2003, 30 (7): 8-9. (in Chinese)
- [7] 康绍忠, 张建华, 梁宗锁, 胡笑涛, 蔡焕杰. 控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路. *干旱地区农业研究*, 1997, 15(1): 1-6.
Kang S Z, Zhang J H, Liang Z S, Hu X T, Cai H J. The controlled alternative irrigation——A new approach for water saving regulation in farm land. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1997, 15(1): 1-6. (in Chinese)
- [8] 武永军, 刘红侠, 梁宗锁, 康绍忠. 分根区干湿交替对玉米光合速率及蒸腾效率的影响. *西北植物学报*, 1999, 19(4): 605-611.
Wu Y J, Liu H X, Liang Z S, Kang S Z. Photosynthesis rate and transpiration efficiency change by alternately drying and wetting on maize plant. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1999, 19(4): 605-611. (in Chinese)
- [9] 肖俊夫, 刘祖贵, 俞希根, 张寄阳, 段爱旺. 滴灌条件下不同供水模式对棉花产量及品质的影响. *棉花学报*, 2000, 12 (4): 194-197.
Xiao J F, Liu Z G, Yu X G, Zhang J Y, Duan A W. Effects of different water application on lint yield and fiber quality of cotton under drip irrigation. *Acta Gossypii Sinica*, 2000, 12 (4): 194-197. (in Chinese)
- [10] 慕自新, 梁宗锁, 张岁岐. 土壤干湿交替下作物补偿生长的生理基础及其在农业中的应用. *植物生理学通讯*, 2002, 38(5): 511-516.
Mu Z X, Liang Z S, Zhang S Q. Physiological basis of compensation growth of crops under soil alternate drying-wetting and its application in agricultural produce. *Plant Physiology Communications*, 2002, 38(5): 511-516. (in Chinese)
- [11] 施积炎, 袁小凤, 丁贵杰. 作物水分亏缺补偿与超补偿效应的研究现状. *山地农业生物学报*, 2000, 19(3): 226-233.
Shi J Y, Yuan X F, Ding G J. The reviews of study on water deficit compensation and over- compensation effect for crops. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2000, 19(3): 226-233. (in Chinese)
- [12] 韩明春, 吴建军, 王 芬. 冗余理论及其在农业生态系统管理中的应用. *应用生态学报*, 2005, 16(2): 375-378.
Han M C, Wu J J, Wang F. Redundancy theory and its application in agro-ecosystem management. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(2): 375-378. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)