

干旱区棉花水分胁迫指数对滴灌均匀系数和灌水量的响应

关红杰, 李久生, 栗岩峰

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 为了修订和完善滴灌均匀系数的设计与评价标准, 在新疆干旱区研究了滴灌均匀系数和灌水量对作物水分胁迫指数(CWSI)的影响。供试作物为棉花, 试验中滴灌均匀系数(C_u)设置 0.65(C1)、0.78(C2)和 0.94(C3)三个水平, 灌水量设置充分灌水量的 50%、75%和 100%三个水平。结果表明: 棉花冠层温度和 CWSI 表现出随灌水量增加而降低的趋势; 冠层温度和 CWSI 均匀系数的变化范围分别为 0.91~0.98 和 0.65~0.91, 均随滴灌均匀系数增加而增大; 灌水量对冠层温度和 CWSI 均值的影响达到极显著水平($\alpha=0.01$), 滴灌均匀系数对冠层温度和 CWSI 均匀系数的影响达到显著水平($\alpha=0.05$)或极显著水平。CWSI 与皮棉产量呈显著或极显著的负相关关系; 滴灌均匀系数越低, 水分亏缺引起的减产幅度越小。

关键词: 作物水分胁迫指数; 滴灌; 均匀系数; 棉花
中图分类号: S275.6; S562 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)01-0052-08

Response of crop water stress index to drip system uniformity and irrigation amount in arid regions

GUAN Hong-jie, LI Jiu-sheng, LI Yan-feng

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The effects of drip system uniformity and irrigation amount on the crop water stress index (CWSI) were evaluated in arid environments of Xinjiang Uygur Autonomous Region, China, during the growing season of cotton in 2011 to amend the current design and evaluation standards of drip system uniformity. Three Christiansen uniformity coefficients (C_u) of 0.65, 0.78, and 0.94 and three irrigation levels of 50%, 75%, and 100% of full irrigation were used. A higher irrigation amount resulted in a lower canopy temperature and CWSI. The uniformity coefficients of canopy temperature and CWSI, which ranged from 0.91 to 0.98 and 0.65 to 0.91, respectively, were positively correlated with the drip system uniformity. Irrigation amount had a significant effect on canopy temperature and CWSI at the 0.01 level. The influence of drip system uniformity on the uniformity coefficient of canopy temperature and CWSI were significant at the 0.05 or 0.01 level. A significantly negative correlation between lint yield and CWSI was observed. The reduction of lint yield caused by water stress for the low uniformity treatment was lower than that for the high uniformity treatment.

Keywords: crop water stress index; drip irrigation; uniformity coefficient; cotton

灌水均匀系数是滴灌系统设计和评价的重要参数之一。采用高的灌水均匀系数虽有利于获得均匀的水分和养分分布, 但可能增加系统投资和运行费用^[1], 而采用较低的灌水均匀系数, 不仅可能造成减产和品质下降, 还有可能导致水分渗漏和养分淋失, 形成面源污染。中国 2009 年发布的《微灌工程技术规范》(GB/T 50485-2009)^[2]中规定, 已建成的微灌系统宜采用灌水均匀系数进行灌水均匀性评价, 灌

收稿日期: 2013-04-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(50979115)
作者简介: 关红杰(1982—), 男, 湖北荆州人, 博士, 主要从事节水灌溉技术与理论方面的研究。E-mail: guanhong311@163.com。
通信作者: 李久生(1962—), 男, 河北邢台人, 研究员, 博士生导师, 主要从事节水灌溉技术与理论方面的研究。E-mail: lij@swhr.com。

水均匀系数(C_u)不宜小于 0.8。美国农业与生物工程学会(ASABE)2003 年发布的标准 EP405.1^[3]中建议凯勒均匀系数 Eu 值为 0.70 ~ 0.95,具体取值需要考虑灌水器类型(点源或线源)、作物、灌水器间距和地形等因素。上述标准中,灌水均匀系数的取值多源于经验值。针对现行微灌均匀系数标准存在的科学依据不足等问题,一些学者在不同气候区针对典型作物研究了滴灌均匀系数对作物产量的影响^[4-6]。实际上,当灌水单元内的平均灌水量可以满足作物需水要求时,滴灌均匀系数对作物生长的影响主要体现在单元内不同区域作物水分胁迫程度的差异,通过对反映作物水分胁迫程度指标的监测,有利于探明滴灌均匀系数对产量的影响机理。

反映作物水分胁迫程度的指标主要有:叶水势、气孔导度、冠层温度和蒸腾速率等,冠层温度能快速测定,取样相对容易而被广泛应用^[7]。在太阳辐射充足条件下,亏缺灌溉的作物冠层温度高于充分灌溉^[8],Idso 等^[9]根据上述原理提出了作物水分胁迫指数 $CWSI$ (Crop Water Stress Index),并给出了它的经验计算模式^[10]。随后,Jackson 等^[11]用冠层能量平衡的单层模型对 Idso 等^[9]的冠气温差上下限方程进行了理论解释,给出了 $CWSI$ 的理论计算公式。国内外学者主要研究了不同水分处理对 $CWSI$ 的影响^[8,10,12-15],以期通过 $CWSI$ 来诊断作物的水分胁迫状况。例如,袁国富等^[10]研究比较了华北平原冬小麦作物水分胁迫指数 $CWSI$ 与叶水势、叶片气孔阻力、叶片最大净光合速率以及土壤水分含量之间的关系,指出 $CWSI$ 理论模式很好地反映了作物的水分胁迫特征。Wanjura 和 Upchurch^[8]研究了不同灌水量对玉米和棉花水分胁迫程度的影响,建立了

$CWSI$ 与作物产量的关系,结果表明 $CWSI$ 与作物产量呈负相关关系。Orta 等^[12]研究了 5 个灌溉水平对 $CWSI$ 和西瓜产量的影响,指出 $CWSI$ 能很好地评估西瓜的水分胁迫程度,可以用来指导灌溉和预测产量。也有学者研究了施氮量对 $CWSI$ 的影响。例如,陈家宙等^[16]评估了玉米水分胁迫指数对 3 个施氮水平的响应,结果表明增施氮肥对 $CWSI$ 的影响因玉米干旱胁迫程度和施氮量而异。对滴灌系统来说,当滴灌均匀系数较低时,可能会导致灌水单元内部分区域灌水量偏少,造成作物水分胁迫,从而影响产量。为了验证这些推论,有必要研究滴灌均匀系数对 $CWSI$ 的影响。

本研究的目的是:基于代表性时段干旱区棉花冠层温度的观测,研究滴灌均匀系数和灌水量对 $CWSI$ 的影响,探讨滴灌均匀系数对产量影响的机理,为滴灌均匀系数标准的修订和完善提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在新疆生产建设兵团水利局灌溉中心试验站(44°06'N,87°30'E,海拔 700 m)进行。试验区属典型的温带大陆性干旱气候,多年平均降水量 190 mm,平均蒸发量 1 600 mm,地下水埋深大于 5 m。距试验地 50 m 安装无线自动气象站(Vantage Pro2,美国 Davis 公司),用来监测降雨量、温度、湿度、太阳辐射和风速等,时间间隔为 30 min。试验地块不同深度的颗粒分析结果(马尔文激光粒度测量法)及土壤容重(环刀取土法)和田间持水率(小区灌水法)列于表 1,0 ~ 20 cm 土壤质地为黏壤土,> 20 ~ 40 cm 和 > 40 ~ 60 cm 土壤质地为壤质黏土(国际制^[17])。

表 1 供试土壤物理特性
Table 1 The physical characteristics of the experimental soils

土层深度 Soil depth /cm	不同粒径颗粒所占百分数 Percentage for a given particle size range/%			土壤容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	田间持水率 Field capacity /(cm ³ ·cm ⁻³)
	2.0 ~ 0.02 mm	< 0.02 ~ 0.002 mm	< 0.002 mm		
0 ~ 20	41.06	34.03	24.91	1.65	0.33
> 20 ~ 40	38.25	35.63	26.12	1.67	0.33
> 40 ~ 60	32.61	41.08	26.31	1.56	0.33

1.2 试验设计

供试作物为棉花(*Gossypium hirsutum*)“新陆早 26 号”。2011 年 5 月 3 日采用“干播湿出”方式播种,即低墒播种,滴灌出苗,出苗水为 15.0 mm。行

距采用宽窄行配置(20 cm + 45 cm + 20 cm),株距 10 cm,南北向种植。覆膜宽 115 cm,1 幅膜覆盖 4 行棉花,滴灌带布置于宽行中间,1 条滴灌带控制 4 行棉花(图 1)。

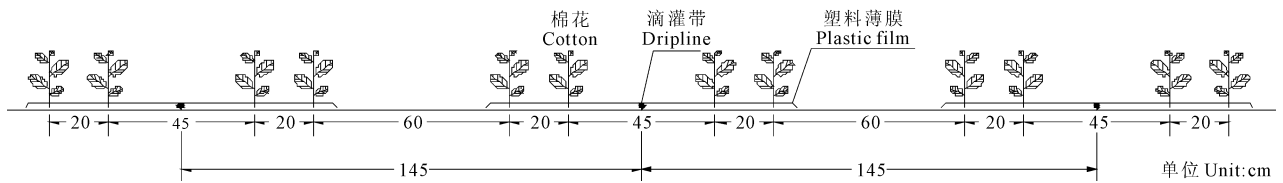


图 1 棉花种植和滴灌带布置模式

Fig. 1 Cotton planting pattern and lateral layout of the drip lines

对特定土壤而言,滴灌均匀性、灌水量及其交互作用可能是影响作物水分胁迫指数 $CWSI$ 的主要因素,因此采用均匀性和灌水量完全组合试验设计,每个因素均设置 3 个水平。

本研究中灌水器流量、冠层温度和 $CWSI$ 的均匀性均用克里斯琴森均匀系数 C_u 表示^[2]

$$C_u = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n\bar{x}} \quad (1)$$

式中, x_i 为各指标的第 i 个观测值,包括:灌水器流量 ($L \cdot h^{-1}$)、冠层温度 ($^{\circ}C$) 和 $CWSI$; $\bar{x}$ 为各指标的均值; n 为各指标的测试个数。

为了探讨降低现行 C_u 标准的可能性,选取现行均匀系数标准 0.8^[2]作为 C_u 的中水平,同时分别设置 1 个低于和高于现行标准的均匀系数水平,即 C_u 设置 0.65、0.80 和 0.95 三个水平(简记为 C1、C2 和 C3)。灌水量水平设置以现行充分灌溉制度(确定方法见 1.3)为基准,并考虑降低灌水量的可能性,设置充分灌溉水量的 50%、75% 和 100% 3 个水平(简记为 I1、I2 和 I3)。试验共 9 个处理,每个处理设置 3 个重复,共 27 个试验小区。每个小区包含 3 幅膜,共 12 行棉花,小区面积为 217.5 m² (50 m × 4.35 m)。小区在田块内随机排列。

C1 和 C2 处理采用 6 种不同流量(0.10 MPa 下标称流量为 1.10、1.40、1.75、2.10、2.70 $L \cdot h^{-1}$ 和 3.00 $L \cdot h^{-1}$;灌水器间距为 30 cm)的灌水器随机组合而成,每种灌水器的个数按灌水单元内灌水器流量服从正态分布的原则^[18],利用 Monte - Carlo 方法确定^[19]。C3 处理采用标称流量为 2.10 $L \cdot h^{-1}$ 的滴灌带,C1、C2 和 C3 处理平均流量设计值均为 2.10 $L \cdot h^{-1}$ 。为了校核组合而成的毛管的均匀系数与设计值是否一致,毛管铺设前对 50 m 长的组合滴灌带的均匀系数进行了实测(每隔 90 cm 设 1 个测点,1 根滴灌带共 56 个点),结果表明,与 3 种滴灌均匀系数设计值对应的实测值分别为 0.65、0.78 和 0.94,对应的灌水器平均流量分别为 1.82、1.86 和 1.80 $L \cdot h^{-1}$,实际值与设计值基本一致^[20]。

1.3 灌水与施肥

对 I3 处理(充分灌水量水平)来说,灌水定额按灌水控制上下限和计划湿润层深度确定,当蕾期和花铃期的根区(0 ~ 60 cm 土层)土壤含水率分别下降到田间持水率的 60% 和 70% 时开始灌水,分别灌至田间持水率的 85% 和 95% 左右;蕾期和花铃期的计划湿润深度分别为 40 cm 和 60 cm;湿润比分别为 53% 和 65%^[21]。试验中每个小区每次的灌水总量 (m³)由按上述方法确定的灌水定额(mm)乘以小区面积确定,通过各小区首部的水表控制,以保证实际灌水量与设计值相等。I1 和 I2 处理的灌溉日期与 I3 处理相同,而灌水量分别为 I3 处理的 50% 和 75%。生育期内共灌水 9 次,I3 处理灌溉定额为 280.0 mm。肥料选用尿素,施氮量为 138.0 $kg \cdot hm^{-2}$,施肥时先将尿素溶于肥料桶中,用压差式施肥罐通过滴灌系统分 7 次施入试验小区。另外,施磷酸二铵 300 $kg \cdot hm^{-2}$ 作为底肥。

棉花生育期内(5 月 3 日—10 月 16 日)大于 5 mm 的降水 6 次:5 月 17 日(6 mm)、5 月 22 日(9.2 mm)、6 月 27 日(5.2 mm)、7 月 2 日(21 mm)、8 月 22 日(8.2 mm)和 8 月 27 日(20.2 mm),降水量共 69.8 mm。

1.4 棉花 $CWSI$ 的监测

各小区沿毛管方向按 3.75 m 等间距布置 13 个测点(第 1 个测点距毛管入口 2 m)(图 2),各测点均选择 4 株棉花(内外行各 2 株)做标记,利用红外测温仪(ST80 ProPlus, Raytek, 美国)在棉花关键生育阶段花期监测冠层温度,正常情况下在灌水 1 d 后测试,且在晴天 15:00—16:00 进行^[22]。利用以下经验公式计算 $CWSI$ ^[8]

$$CWSI = \frac{TC_i - TC_{\min}}{TC_{\max} - TC_{\min}} \quad (2)$$

式中, $CWSI$ 为作物水分胁迫指数; TC_i 为各测点作物冠层温度 ($^{\circ}C$); $TC_{\min}$ 为作物处于充分供水状态下的冠层温度 ($^{\circ}C$); $TC_{\max}$ 为作物处于严重缺水状态下的冠层温度 ($^{\circ}C$)。低均匀系数高灌溉水平处理(C1I3)灌水单元内的高灌水区域的冠层温度可以近

表 2 棉花冠层温度均值和均匀系数

Table 2 The mean and christiansen uniformity coefficients (C_u) of the canopy temperature of the cotton plant

指标 Parameter	日期 Date(M - d)	处理 Treatments									方差分析 ANOVA		
		C1I1	C2I1	C3I1	C1I2	C2I2	C3I2	C1I3	C2I3	C3I3	C	I	C × I
均值 Mean/℃	07 - 24	27.5	27.4	27.6	27.0	26.6	26.3	26.7	26.1	25.2	NS($p=0.17$)	** ($p=0.00$)	NS($p=0.50$)
	08 - 02	29.4	28.6	28.6	26.5	26.2	25.6	25.9	26.0	25.4	* ($p=0.04$)	** ($p=0.00$)	NS($p=0.67$)
	08 - 07	28.2	27.9	27.4	25.6	25.6	26.1	25.3	25.7	25.7	NS($p=0.99$)	** ($p=0.00$)	NS($p=0.30$)
	08 - 15	28.0	27.5	27.7	25.4	25.6	25.4	24.8	25.3	24.6	NS($p=0.73$)	** ($p=0.00$)	NS($p=0.78$)
	08 - 20	29.7	28.4	28.5	26.8	27.4	26.8	26.7	26.3	25.7	NS($p=0.11$)	** ($p=0.00$)	NS($p=0.25$)
C_u	07 - 24	0.97	0.97	0.98	0.97	0.97	0.97	0.94	0.96	0.97	* ($p=0.05$)	** ($p=0.01$)	NS($p=0.38$)
	08 - 02	0.91	0.93	0.97	0.94	0.96	0.98	0.95	0.97	0.98	** ($p=0.00$)	** ($p=0.00$)	NS($p=0.12$)
	08 - 07	0.93	0.94	0.97	0.95	0.97	0.98	0.95	0.97	0.97	** ($p=0.00$)	** ($p=0.01$)	NS($p=0.32$)
	08 - 15	0.94	0.95	0.97	0.95	0.97	0.97	0.96	0.97	0.97	** ($p=0.00$)	NS($p=0.13$)	NS($p=0.27$)
	08 - 20	0.96	0.96	0.98	0.95	0.97	0.98	0.96	0.97	0.96	** ($p=0.00$)	NS($p=0.30$)	* ($p=0.03$)

注: C 为滴灌均匀系数, I 为灌水量; C1、C2 和 C3 表示 3 个均匀系数水平, 分别为 0.65、0.78 和 0.94; I1、I2 和 I3 表示 3 个灌水量水平, 分别为充分灌溉水量的 50%、75% 和 100%。下同。

Note: C and I represent drip system uniformity and irrigation amount, respectively; C1, C2 and C3 represent low, medium and high uniformity, respectively; I1, I2 and I3 represent low, medium and high irrigation level, respectively. The same as below.

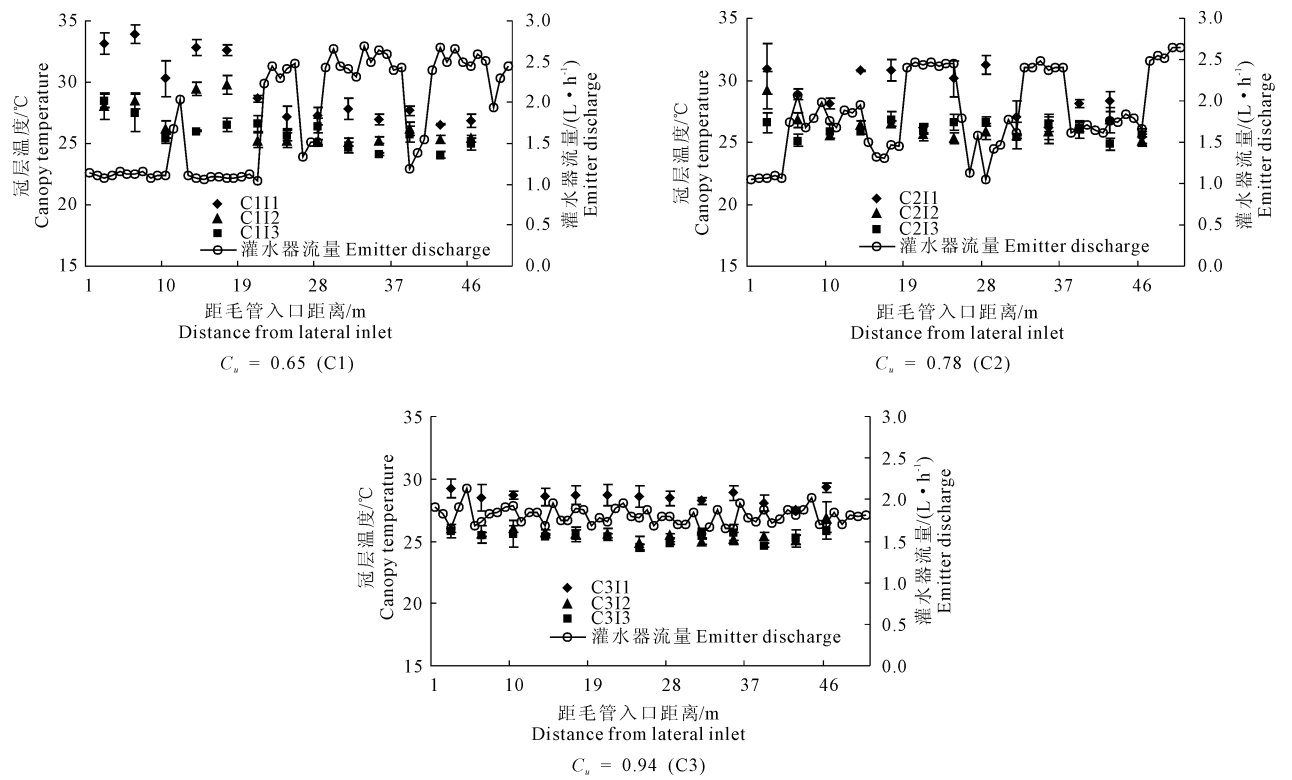


图 3 2011 年 8 月 2 日监测的冠层温度和灌水器流量沿毛管变化情况

Fig.3 Comparison between the variations of canopy temperature and the variations in emitter discharge rates along a dripline on 2 August 2011

由表 4 还可以看出, $CWSI$ 均匀系数的变化范围为 0.65 ~ 0.91, 低于冠层温度均匀系数, 随滴灌均匀系数增加而增大。例如, 对于中灌溉水平 (I2), 8 月 2 日监测的 $CWSI$ 均匀系数在 C1、C2 和 C3 均匀系数水平下分别为 0.70、0.77 和 0.85。方差分析结果表

明, 滴灌均匀系数对 $CWSI$ 均匀系数的影响达到显著或极显著水平 (7 月 24 日除外)。滴灌均匀系数和灌水量的交互作用对棉花 $CWSI$ 均值和均匀系数的影响均不显著 (8 月 20 日交互作用对 $CWSI$ 均匀系数的影响除外)。

表 3 各处理沿毛管方向冠层温度与灌水器流量的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between canopy temperature and emitter discharge rate along the laterals for each treatment		日期 Date(M - d)				
处理 Treatments		07 - 24	08 - 02	08 - 07	08 - 15	08 - 20
C1I1		- 0.717 * *	- 0.789 * *	- 0.753 * *	- 0.807 * *	- 0.498
C1I2		- 0.567 *	- 0.662 * *	- 0.826 * *	- 0.795 * *	- 0.734 * *
C1I3		- 0.746 * *	- 0.765 * *	- 0.819 * *	- 0.777 * *	- 0.813 * *
C2I1		- 0.182	- 0.461	- 0.484	- 0.360	- 0.298
C2I2		- 0.360	- 0.634 *	- 0.378	- 0.502	- 0.272
C2I3		- 0.596 *	0.065	- 0.238	- 0.527	- 0.736 * *
C3I1		0.151	- 0.315	- 0.349	0.049	- 0.136
C3I2		- 0.083	0.032	0.600 *	0.005	- 0.130
C3I3		- 0.623 *	- 0.443	- 0.076	0.100	- 0.143

注: * 表示相关关系在 0.05 水平上显著; * * 表示相关关系在 0.01 水平上显著。
Note: * represent significant at the 0.05 level; * * represent significant at the 0.01 level.

表 4 棉花 CWSI 均值和均匀系数

Table 4 The mean and christiansen uniformity coefficients (C_u) of the crop water stress index ($CWSI$) of the cotton plant		处理 Treatments									方差分析 ANOVA		
指标 Parameter	日期 Date(M - d)	C1I1	C2I1	C3I1	C1I2	C2I2	C3I2	C1I3	C2I3	C3I3	C	I	C × I
均值 Mean/℃	07 - 24	0.25	0.25	0.26	0.23	0.22	0.20	0.22	0.20	0.16	NS($p = 0.17$)	* * ($p = 0.00$)	NS($p = 0.50$)
	08 - 02	0.33	0.31	0.30	0.21	0.20	0.17	0.19	0.19	0.17	* ($p = 0.04$)	* * ($p = 0.00$)	NS($p = 0.81$)
	08 - 07	0.29	0.27	0.25	0.18	0.18	0.20	0.16	0.18	0.18	NS($p = 0.99$)	* * ($p = 0.00$)	NS($p = 0.30$)
	08 - 15	0.28	0.26	0.26	0.17	0.17	0.17	0.14	0.16	0.13	NS($p = 0.73$)	* * ($p = 0.00$)	NS($p = 0.78$)
	08 - 20	0.35	0.29	0.30	0.22	0.25	0.22	0.22	0.21	0.18	NS($p = 0.11$)	* * ($p = 0.00$)	NS($p = 0.25$)
C_u	07 - 24	0.86	0.88	0.90	0.86	0.87	0.86	0.72	0.78	0.80	NS($p = 0.14$)	* * ($p = 0.00$)	NS($p = 0.63$)
	08 - 02	0.68	0.73	0.87	0.70	0.77	0.85	0.73	0.82	0.85	* * ($p = 0.00$)	NS($p = 0.29$)	NS($p = 0.52$)
	08 - 07	0.69	0.75	0.86	0.66	0.79	0.88	0.70	0.80	0.81	* * ($p = 0.00$)	NS($p = 0.94$)	NS($p = 0.59$)
	08 - 15	0.73	0.78	0.88	0.65	0.83	0.79	0.71	0.80	0.77	* ($p = 0.04$)	NS($p = 0.59$)	NS($p = 0.52$)
	08 - 20	0.84	0.83	0.91	0.76	0.86	0.89	0.77	0.82	0.78	* * ($p = 0.00$)	* * ($p = 0.00$)	* ($p = 0.02$)

注: NS 表示在 0.05 水平上不显著; * 表示在 0.05 水平上显著; * * 表示在 0.01 水平上显著。
Note: NS represent not significant at the 0.05 level; * represent significant at the 0.05 level; * * represent significant at the 0.01 level.

为了更直观地分析滴灌均匀系数对 $CWSI$ 的影响,图 4 比较了 8 月 2 日监测的棉花 $CWSI$ 和灌水器流量沿毛管的变化,其它日期监测结果与之类似。对沿毛管方向的 $CWSI$ 与灌水器流量进行相关分析,结果与冠层温度类似,C1 和 C2 均匀系数水平的 $CWSI$ 表现出随灌水器流量增加而减小的趋势。

2.3 $CWSI$ 与产量的关系

为了分析滴灌均匀系数对产量影响的机理,图 5 分别给出了各均匀系数水平 $CWSI$ 均值(5 次监测的均值)和皮棉产量的关系。可以看出,不同均匀系数水平下, $CWSI$ 与皮棉产量呈显著或极显著的负相关关系。该结果与前人类似^[8,26-27]。C1、C2 和 C3 均匀系数水平的 $CWSI$ 分别能解释皮棉产量变化的

53%、97%和 85%,说明 $CWSI$ 能较好地解释不同水分胁迫程度对皮棉产量的影响。另外,比较图 5a、5b 和 5c 还可以看出,随着滴灌均匀系数的增加,皮棉产量和 $CWSI$ 关系的斜率呈增大趋势。这一结果说明,滴灌均匀系数越高,水分亏缺引起的减产幅度越大。这可能是由于在 C1 均匀系数水平下,当平均灌水量满足作物需水要求时,灌水单元内的部分区域灌水量会超过棉花需水量,未引起水分胁迫,在一定程度上减轻了水分胁迫引起的产量降低幅度;而在 C3 均匀系数水平下,灌水单元内的各区域灌水量接近一致,一旦灌水量不能满足作物需水要求,整个灌水单元内都会遭受水分胁迫,作物的减产幅度就可能增大。

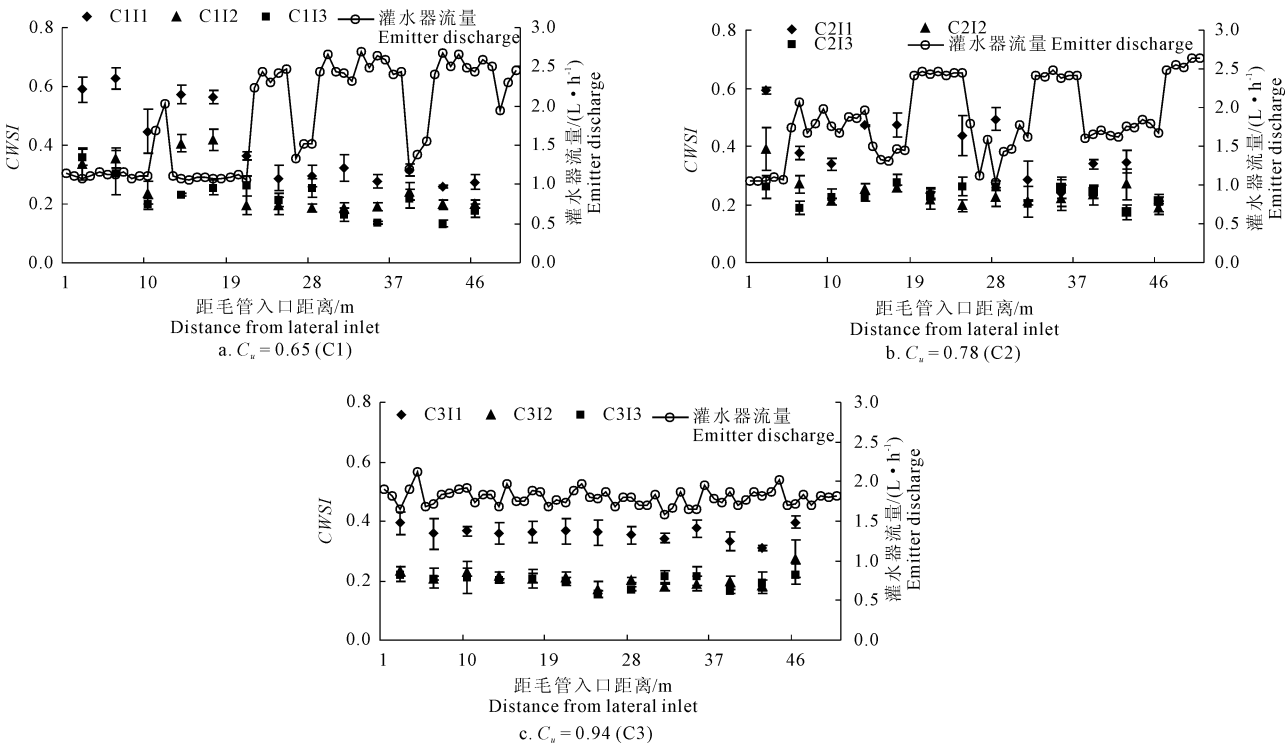


图 4 2011 年 8 月 2 日监测的 $CWSI$ 和灌水器流量沿毛管变化情况

Fig.4 Comparison between the variations of $CWSI$ and the variations in emitter discharge rates along a dripline on 2 August 2011

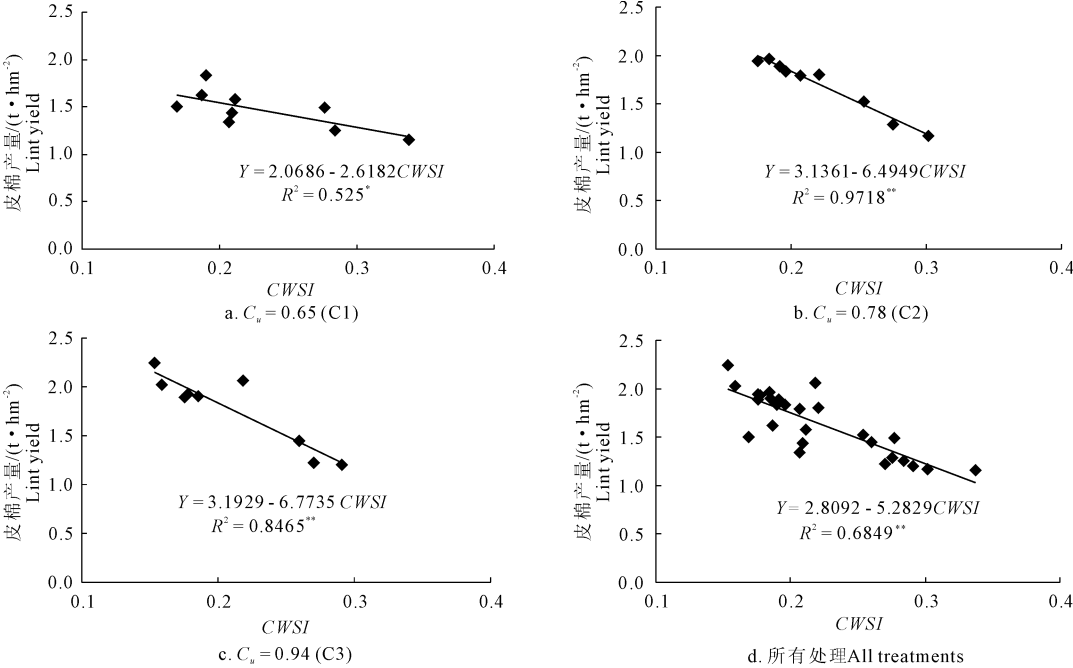


图 5 不同均匀系数水平的 $CWSI$ 均值与皮棉产量的关系

Fig.5 Relationship between $CWSI$ and lint yield for different system uniformity treatments

3 结 论

基于代表性时段干旱区棉花冠层温度的观测,研究了滴灌均匀系数和灌水量对作物水分胁迫指数 $CWSI$ 的影响,探讨了滴灌均匀系数对产量的影响机

理,主要结论如下:

1) 棉花冠层温度和 $CWSI$ 均随灌水量的增加而降低;冠层温度和 $CWSI$ 的均匀系数的变化范围分别为 0.91 ~ 0.98 和 0.65 ~ 0.91,均随滴灌均匀系数的增加而增大;灌水量对冠层温度和 $CWSI$ 均值的

影响均达到极显著水平($\alpha = 0.01$),滴灌均匀系数对冠层温度和 *CWSI* 均匀系数的影响均达到显著水平($\alpha = 0.05$)或极显著水平。

2) *CWSI* 与皮棉产量呈显著或极显著的负相关关系, *CWSI* 可以解释皮棉产量变化的 53% ~ 97%, 该指标能较好地反映不同水分亏缺程度对皮棉产量的影响;滴灌均匀系数越低,水分亏缺引起的减产幅度越小。

参 考 文 献:

[1] 陈渠昌.滴灌均匀度的模拟研究[D].北京:北京农业工程大学,1993.

[2] 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.

[3] ASABE. EP405.1 – 1988. Design and installation of microirrigation systems[S]. St. Joseph, Mich.: ASABE, 1988.

[4] Bordovsky J P, Porter D O. Effect of subsurface drip irrigation system uniformity on cotton production in the Texas high plains[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008,24(4):465-472.

[5] 李久生,尹剑锋,张航,等.滴灌均匀系数和施氮量对白菜生长及产量和品质的影响[J].农业工程学报,2011,27(1):36-43.

[6] 张航,李久生.华北平原春玉米生长和产量对滴灌均匀系数及灌水量的响应[J].农业工程学报,2011,27(11):176-182.

[7] 康绍忠,蔡焕杰.农业水管理学[M].北京:中国农业出版社,1996.

[8] Wanjura D F, Upchurch D R. Canopy temperature characterizations of corn and cotton water status[J]. Transactions of the ASAE, 2000,43(4):867-875.

[9] Idso S B, Jackson R D, Pinter Jr P J, et al. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability[J]. Agricultural Meteorology, 1981,24:45-55.

[10] 袁国富,罗毅,孙晓敏,等.作物冠层表面温度诊断冬小麦水分胁迫的试验研究[J].农业工程学报,2002,18(6):13-17.

[11] Jackson R D, Kustas W P, Choudhury B J. A reexamination of the crop water stress index[J]. Irrigation Science, 1988,9:309-317.

[12] Orta A H, Erdem Y, Erdem T. Crop water stress index for watermelon[J]. Scientia Horticulturae, 2003,98:121-130.

[13] 张振华,蔡焕杰,杨润亚,等.膜下滴灌棉花产量和品质与作物缺水指标的关系研究[J].农业工程学报,2005,21(6):26-29.

[14] Erdem Y, Arin L, Erdem T, et al. Crop water stress index for assessing irrigation scheduling of drip irrigated broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) [J]. Agricultural Water Management, 2010, 98:148-156.

[15] O’Shaughnessy S A, Evett S R, Colaizzi P D, et al. Using radiation thermography and thermometry to evaluate crop water stress in soybean and cotton [J]. Agricultural Water Management, 2011, 98 (10): 1523-1535.

[16] 陈家宙,林丽蓉,吕国安,等.红壤施氮对玉米水分胁迫指数的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(5):1114-1119.

[17] 秦耀东.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2003:7-9.

[18] Nakayama F S, Bucks D A, Clemmens A J. Assessing trickle emitter application uniformity[J]. Transactions of the ASAE, 1979,22(4): 816-821.

[19] 裴鹿成,王仲奇.蒙特卡罗方法及其应用[M].北京:海洋出版社,1998.

[20] 关红杰,李久生,栗岩峰.干旱区滴灌均匀系数和灌水量对土壤水氮分布的影响[J].农业工程学报,2012,28(24):121-128.

[21] 李明思,郑旭荣,贾宏伟,等.棉花膜下滴灌灌溉制度试验研究[J].中国农村水利水电,2001,(11):13-15.

[22] Gardner B R, Nielsen D C, Shock C C. Infrared thermometry and the crop water stress index. II. Sampling procedure and interpretation [J]. Journal of Production Agriculture, 1992,5:466-475.

[23] Thom A S, Oliver H R. On Penman’s equation for estimating regional evaporation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1977,103(436):345-357.

[24] Gonzalez-Dugo M P, Moran M S, Mateos L, et al. Canopy temperature variability as an indicator of crop water stress severity[J]. Irrigation Science, 2006,24(4):233-240.

[25] 王卫星,宋淑然,许利霞,等.基于冠层温度的夏玉米水分胁迫理论模型的初步研究[J].农业工程学报,2006,22(5):194-196.

[26] Pinter P J, Fry K E, Guinn G, et al. Infrared thermometry: a remote sensing technique for predicting yield in water-stressed cotton[J]. Agricultural Water Management, 1983,6:385-395.

[27] Howell T A, Hatfield J L, Yamada H. Evaluation of cotton canopy temperature to detect crop water stress [J]. Transactions of the ASAE, 1984,27:84-88.