

不同土壤条件下节水灌溉对棉花产量和灌溉水生产力的影响*

苏永中 杨荣 杨晓 王婷 王敏

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所临泽内陆河流域研究站/中国科学院内陆河流域生态-水文重点实验室, 兰州 730000)

摘要 在黑河中游边缘绿洲通过田间试验研究不同土壤条件下节水灌溉对棉花产量及灌溉水生产力(Irrigation Water Productivity, IWP)的影响,为区域农业土壤的合理利用和制定不同土壤的灌溉对策提供依据。田间试验涉及不同肥力和粒级组成梯度的 5 种土壤(砂土 S1、S2;壤砂土 S3 和砂壤土 S4、S5 三个质地类型),设三个灌溉水平:常规充分灌溉(I1)、减量 10.5% 节水灌溉(I2)和减量 21.0% 节水灌溉(I3)。结果表明,与充分灌溉相比,减量 10.5% 和 21.0% 的节水灌溉,在棉花不同生育期的地上单株生物量和叶面积及收获时的茎干生物量有所降低,但籽棉产量增加了 11.6% 和 11.2%。在减量 10.5% 和 21.0% 的节水灌溉下棉花 IWP 分别为 0.51 kg m^{-3} 和 0.57 kg m^{-3} ,较传统灌溉(0.41 kg m^{-3})提高 24.4% 和 39.0%。不同质地土壤棉花生物量、产量及棉花 IWP 有显著差异。棉花 IWP 随土壤黏粉粒和有机质含量的增加而增加,但在黏粉粒和有机质含量最高的土壤出现下降,呈多项式关系。土壤质地与灌溉量对棉花霜前花率、生物量及产量有显著的交互效应。有机质和黏粉粒含量最高的砂壤土 S5 在充分灌溉下营养生长过旺、吐絮期延后,导致霜前花率降低、籽棉产量和 IWP 降低。节水灌溉可显著提升棉花 IWP,在水资源紧缺的边缘绿洲区,对新垦的砂质土壤种植耗水量较低的棉花、并进行节水灌溉管理,是实现区域节水和合理利用土地的适宜选择。

关键词 土壤质地;常规灌溉;节水灌溉;棉花产量;灌溉水生产力

中图分类号 S153 **文献标识码** A

作物灌溉水生产力(IWP)受气候、土壤、作物品种、以及灌溉、耕作、施肥等农业管理措施的影响^[1]。在相同的气候条件和农业管理水平下,IWP 的高低主要取决于土壤条件^[2]。因此,通过采用先进的灌溉技术提高水生产力外,近年来越来越强调土壤管理在农业水管理中的作用,通过退化土地的修复、实施保护性耕作和平衡施肥等途径改善土壤结构和肥力,成为提高作物 IWP 最具潜力的途径^[2-3]。在区域尺度的灌溉水配置方面,针对不同质地的土壤确定作物灌溉需水、制定适宜的灌溉定额和时期等灌溉对策,进而依据土壤条件进行灌溉用水的合理分配是提高灌溉水生产力的关键和区域节水的重要环节^[4-5]。

在许多研究中,土壤条件对作物水分利用效率或水生产力的影响,一般选择不同质地的土壤进行比较研究^[4,6]。土壤质地影响土壤结构、通气、保水

及保肥等一系列土壤性状,可以综合反映土壤结构和肥力水平。土壤质地对作物水分利用效率的影响,一方面是土壤粒级组成决定着土壤持水能力、土壤水分入渗及其在剖面中的分布和滞留时间,进而直接影响土壤-作物系统的水平衡和作物蒸散^[7-9];另一方面,土壤质地影响作物根系生长与分布^[6,10-11],进而影响作物对养分的吸收^[4,12];并影响氮的淋溶损失^[13]及肥料利用效率^[12],因而间接影响作物水分利用效率和 IWP。但不同作物根系分布、干物质积累及产量形成等对土壤质地的反应不同^[6,8,14]。土壤质地与灌溉水平对作物灌溉水生产力形成有显著的交互效应,不同作物在不同质地的土壤有不同的灌溉策略^[4]。因此,在水资源紧缺区域,确定土壤性状对作物水生产力的影响,探讨适宜不同耗水和灌溉需水量的作物生长的适宜土壤类型、制定不同质地土壤的合理灌溉方案,对因地

* 国家自然科学基金项目(91125022,41201284)和中国科学院重点部署项目(KSZD-EW-022-01)资助

作者简介:苏永中(1966—),甘肃古浪人,研究员,主要从事干旱区土壤学与绿洲农业生态学研究。E-mail: suyzh@lzb.ac.cn; Tel: 0931-4967070

收稿日期: 2014-04-16; 收到修改稿日期: 2014-06-25

制宜合理布局种植结构、改良土壤、提高灌溉水生产力及区域节水具重要作用。

甘肃河西走廊黑河流域中游荒漠边缘绿洲区,典型的荒漠气候、充足的光热资源,适于优质棉花的生产。但棉花种植普遍采用传统的大水漫灌方式、水效益低下;同时由于边缘绿洲区农田开垦利用年限的不同,土壤性状在小区域尺度存在高度的变异性,棉花产量差异极大。在灌溉用水分配方面,按种植面积的配水管理,造成不同土壤条件的农田作物灌溉需水的盈余或亏缺,也是荒漠绿洲边缘新垦砂质农田区域地下水过度开采的原因之一^[5]。目前在西北干旱区荒漠绿洲棉花灌溉水利用效率的研究,主要集中在不同灌溉方式如膜下滴灌(主要在新疆绿洲)^[15-16]、隔沟交替灌溉^[17]对棉花产量和水分利用效率的影响方面。在传统灌溉方式下,减量灌溉的产量效应、水效益及节水潜力研究仍是水资源紧缺的荒漠绿洲棉花生产所需。现有的研究也很少涉及到土壤条件对棉花产量及灌溉水生产力的影响,因此在水管理方面,很少考虑依据不同土壤条件进行灌溉用水的合理分配。本项研究在黑河中游边缘绿洲区,在确定不同土壤对玉米灌溉水生产力的影响后^[5],进一步研究不同质地土壤及灌溉量对棉花产量形成及灌溉水生产力的影响,以期探讨适合边缘绿洲区棉花产量形成及高效节水的适宜土壤类型、分析不同质地土壤适宜的节水灌溉对策,为边缘绿洲种植结构的合理布局 and 灌溉用水的合理分配及区域节水潜力评估提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验布设在中国科学院生态系统网络临泽内陆河流域研究站(39°24'N, 100°21'E,海拔 1 350 m),位于甘肃河西走廊中段临泽北部平川绿洲。该区域为典型的荒漠气候,多年平均降水量为 116.8 mm,年蒸发量 2 390 mm,年均气温 7.6℃,≥10℃的年积温 3 088℃,无霜期 165 d,初霜期一般在 10 月上旬至中旬;农田区域地下水位在 3~8 m。土壤类型黑河沿岸分布有小面积的绿洲潮土和灌淤土,大部分农田土壤为自然荒漠土壤(灰棕漠土和风砂土)开垦后形成的灌漠土,由于开垦年限不同,土壤熟化程度各异,在空间上存在明显的异质性分布^[5]。近年来主要种植制种玉米、棉花和制酱蕃茄等。

1.2 试验设计

土壤质地对作物产量及灌溉水生产力的影响研究,大多采用将不同质地土壤移置在小型 lysimeter 中^[4,12]或采用盆栽或池栽方式进行^[11]。本项试验采用田间小区试验方法,更符合生产实际。供试土壤由粒级组成、有机质及养分含量存在明显梯度的 5 种土壤组成(S1, S2, S3, S4, S5),于 2012 年作物收获后从研究区域不同土壤发育程度农田移置,按 20 cm 一个层次取土,并按原有层次填埋至试验小区,而后进行灌溉沉实。移置土层深度按土壤发育程度为 40~80 cm,80 cm 土层以下土壤性状一致。5 种土壤可代表研究区域近 50 a 来不同时期开垦农田的基本性状。

每种土壤有 9 个小区,小区面积 20 m² (4 m × 5 m),共 45 个小区,小区的排列为 5 排,每排 9 个小区为一种土壤。小区之间 0~100 cm 深度由隔水材料分隔,小区中间埋设有中子管。试验地地下水位波动在 3.8~5.0 m,随灌溉用水时期而波动。2012 年进行了玉米灌溉试验^[5],2012 年试验前测定的 5 种土壤的基本性状如表 1。按耕层土壤粒级组成的美国农业部土壤质地分类,S1、S2 为砂土,S3 为壤质砂土,S4、S5 为砂质壤土。根据土壤发育程度,S1、S2、S3 为灌耕风砂土,S4、S5 其成土母质同样为风积砂,但经多年耕种熟化,已转变为灌漠土。

2013 年进行棉花灌溉试验,每种土壤设 3 个灌溉水平:常规充分灌溉 I1(总灌溉量 5 700 m³ hm⁻²,为当地农户的正常灌溉水平)、10.5% 节水灌溉 I2(5 100 m³ hm⁻²,较常规灌溉减量 10.5%),21.0% 节水灌溉 I3(4 500 m³ hm⁻²,较常规灌溉减量 21.0%)。分 5 次灌溉:播种后(4 月 28 日)、6 月 28 日、7 月 22 日、8 月 10 日和 8 月 30 日。灌水量用灌水管末端的水表控制计量。试验为随机区组设计,5 种土壤为 5 个区组,每种土壤每个灌溉处理设 3 次重复。

施肥量为 N-P₂O₅-K₂O: 240-120-105 kg hm⁻²,所用化肥为尿素(含 N 量 460 g kg⁻¹)和湖北新洋丰复合肥(N-P₂O₅-K₂O 含量为 15%-16%-14%),P、K 肥全部在播种时基施,47% 的 N 肥作基肥,其余分两次分别在苗期和现蕾期(第二、第三次灌溉前)追施。

供试棉花品种为 K4 (*Gossypium hirsutum* Cv. K4),2013 年 4 月 28 日播种,覆膜种植,膜宽 60 cm,膜间距 40 cm,一膜二行,行距 40 cm,株距 30 cm,留双株,每个小区覆膜 4 行,种植棉花 8 行,其中 1 行作为动态取样区,其余 7 行进行收获计产。10 月 20 日一次性收获。

表 1 田间灌溉试验土壤理化性状

Table 1 Soil physical and chemical properties of the fields in the field irrigation experiment

土壤 Soils	土层 Soil layer (cm)	砂粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	黏粒 Clay (%)	容重 BD ¹⁾ (g cm ⁻³)	有机质 SOM ²⁾ (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	田间持水量 FWC ³⁾ (%)
砂土 Sand S1	0 ~ 20	83.1	7.4	9.6	1.60	5.03	0.38	17.2
	20 ~ 40	87.3	5.2	7.4	1.55	3.54	0.23	
	40 ~ 60	89.8	3.8	6.4	1.55	2.43	0.14	
	60 ~ 80	91.3	2.8	5.8	1.60	2.02	0.12	
	80 ~ 100	91.7	2.6	5.7	1.62	1.78	0.12	
砂土 Sand S2	0 ~ 20	80.1	8.9	11.0	1.49	5.90	0.33	17.8
	20 ~ 40	90.6	5.1	4.3	1.53	3.83	0.21	
	40 ~ 60	91.6	2.4	6.0	1.58	1.78	0.20	
	60 ~ 80	92.5	1.9	5.6	1.63	1.74	0.10	
	80 ~ 100	92.0	2.2	5.8	1.62	1.66	0.10	
壤砂土 Loamy sand S3	0 ~ 20	65.5	18.2	16.3	1.49	7.62	0.50	20.4
	20 ~ 40	76.7	11.5	11.8	1.55	5.74	0.40	
	40 ~ 60	87.6	4.9	7.5	1.55	3.34	0.08	
	60 ~ 80	91.8	2.3	5.8	1.56	2.32	0.10	
	80 ~ 100	92.3	2.1	5.6	1.56	1.8	0.08	
砂壤土 Sandy loam S4	0 ~ 20	57.8	24.4	17.8	1.39	9.99	0.76	22.3
	20 ~ 40	55.4	26.3	18.3	1.44	8.18	0.59	
	40 ~ 60	72.0	14.7	13.3	1.45	7.12	0.43	
	60 ~ 80	85.1	5.5	9.4	1.55	3.21	0.20	
	80 ~ 100	90.8	2.6	6.7	1.56	2.82	0.14	
砂壤土 Sandy loam S5	0 ~ 20	54.1	27.7	18.2	1.39	11.49	0.85	26.2
	20 ~ 40	50.6	27.7	21.7	1.44	8.87	0.65	
	40 ~ 60	55.1	26.7	18.2	1.49	7.48	0.59	
	60 ~ 80	76.5	11.5	12.0	1.55	6.52	0.30	
	80 ~ 100	90.3	3.0	6.7	1.56	2.56	0.15	

1) BD; Bulk density; 2) SOM; Soil organic matter; 3) FWC; Field water capacity

1.3 测定项目

在播种前、收获后及棉花生育期每次灌溉前用中子仪和烘干法两种方法结合测定 0 ~ 100cm 土层 (20 cm 间隔取样) 土壤含水量。在中子仪测定土壤含水量时, 对每种土壤用烘干法进行了校正, 每次测定的表层土壤用烘干法。为了解不同土壤灌溉后土壤水分的滞留时间, 在第三次灌溉 (7 月 22 日) 后的第 1、第 3、第 5、第 7 天连续测定土壤含水量变化。

在棉花生长期, 分别在棉花苗期 (6 月 13 日)、现蕾期 (7 月 17 日)、花铃前期 (8 月 11 日)、花

铃后期 (9 月 13 日) 和吐絮后期 (收获时, 10 月 16 日) 在动态取样区 (1 行) 取 3 株测定地上部干物质, 在现蕾期、花铃前期和花铃后期测定叶面积。测定叶面积时分单株用 LI-COR 3100A 台式叶面积仪测定。在收获时, 除小区动态取样区外, 进行全区籽棉和地上部生物量的收获计产, 并在每小区随机取 10 株进行考种, 测定单株结铃数、单铃重和衣分。

1.4 数据处理

灌溉水生产力 (kg m⁻³) = 籽棉产量 (kg) / 总灌溉水量 (m³)^[18]。试验数据采用 SPSS 软件进行随机区组的方差分析及显著性检验, 并进行灌溉水生产

力与土壤属性值之间的回归分析。

2 结 果

2.1 土壤性状与灌溉水平对棉花干物质形成和叶面积的影响

对棉花地上部干物质形成和积累的测定表明,不同时期测定的单株地上生物量不同土壤之间差异显著(图 1),苗期(6 月 13 日)测定,单株地上生物量变动在 0.89 g(S2)~3.12g(S5),在花铃前期(8 月 11 日),两个砂壤土(S4,S5)单株地上生物量达到最大,随后由于开花后花的凋落和部分花铃脱落,生物量开始下降;不同土壤之间的差异也达到最大,变动在每株 51.2 g(S1)~103.8 g(S4)。砂

土(S1,S2)和壤砂土(S3)在花铃后期开始吐絮后,地上生物量随部分花铃的脱落开始下降。收获时测定,不同土壤之间单株地上生物量仍有显著差异,但较花铃前期差异缩小,变动在每株 27.1 g(S1)~72.0 g(S5)。灌溉水平对地上生物量的积累也有显著的影响,不同生育期的单株生物量均为 I1 > I2 > I3。

三个时期测定的单株叶面积在不同土壤和不同灌溉水平下,与单株地上生物量有相同的趋势(图 2),单株叶面积在不同时期均为砂壤土(S4,S5)高于壤砂土(S3)高于砂土(S1,S2)。灌溉水平之间比较,尽管在现蕾期和花铃前期测定,差异不显著,但均表现为 I1 > I2 > I3。

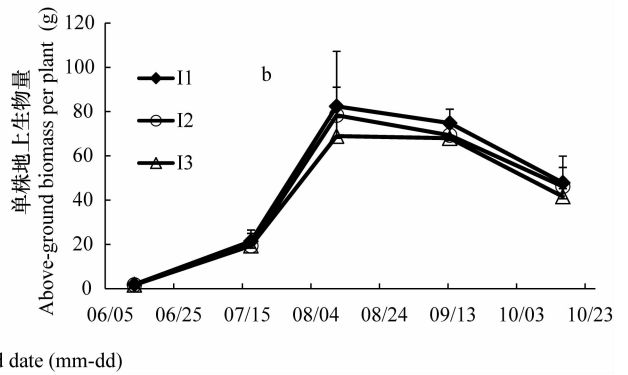
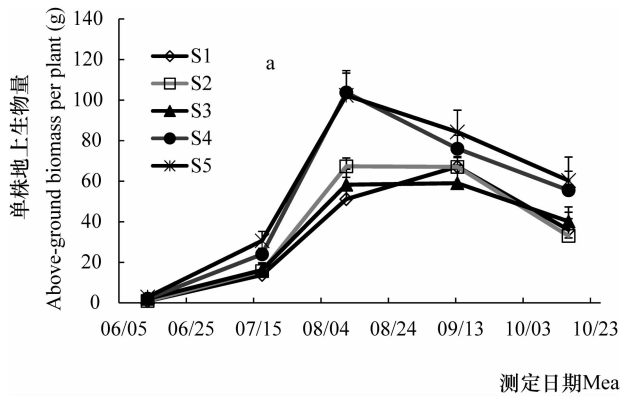
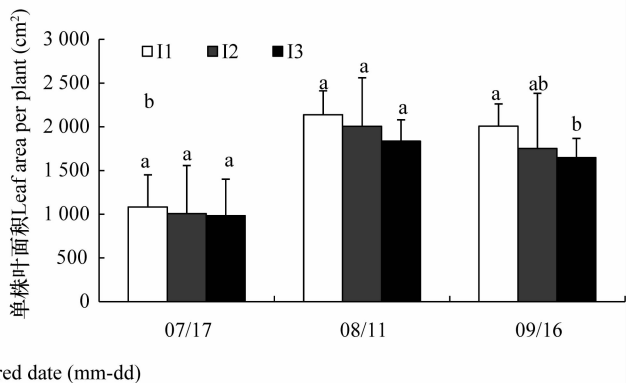
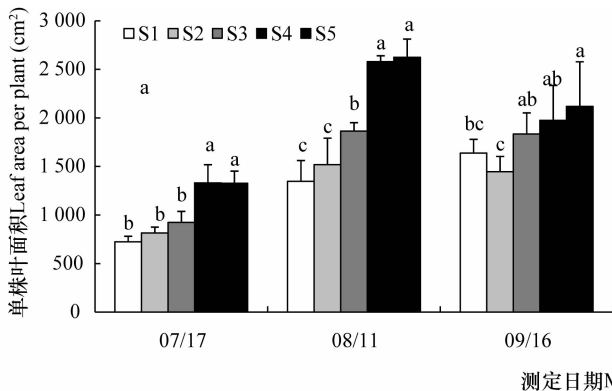


图 1 不同土壤和灌溉水平下棉花单株生物量

Fig. 1 Biomass per cotton plant relative to soil and irrigation rate



不同字母表示不同土壤之间和灌溉处理之间单株叶面积的差异显著性 ($p < 0.05$)

The different lowercase letters show significant differences ($p < 0.05$) in leaf area per plant between the five soils and between the three irrigation levels

图 2 不同土壤和灌溉水平下棉花单株叶面积

Fig. 2 Leaf area per cotton plant relative to soil and irrigation rate

2.2 土壤性状与灌溉水平对棉花生物量及产量的影响

表 2 结果表明,与常规充分灌溉(I1)比较,节水

10.5%(I2)和节水 21.0%(I3)的两个处理,除砂土(S1)外,籽棉产量均有所增加。砂壤土 S5 的灌溉处理之间,差异达极显著水平。5 种土壤平均,灌溉

处理之间差异显著, I2 和 I3 分别较常规灌溉 I1, 籽棉产量增加 11.6% 和 11.2%。但灌溉对茎干生物量的影响表现出与籽棉产量相反的趋势, 常规灌溉的茎干生物量高于节水灌溉, 两个砂壤土 (S4, S5) 灌溉处理之间达极显著水平。5 种土壤平均, 茎干生物量在两个节水灌溉处理下, 较常规灌溉分别降低 15.7% (I2) 和 14.3% (I3)。分析产量构成因素发现, 常规灌溉较节水灌溉处理有较高的单株结铃数, 但霜前花的比例明显降低, 特别是壤砂土 (S3) 和

两个砂壤土 (S4, S5)。但灌溉水平对棉花单铃重和衣分并无显著影响。

土壤对棉花生物量、产量及产量构成要素有显著的影响 (表 2)。茎干生物量随土壤有机质含量和黏粉粒含量的增加而显著增加, 但籽棉产量在 S4 上最高, 有机质和黏粉粒含量最高的砂壤土 S5 籽棉产量低于 S4 和 S3, 与沙土 S2 也无显著差异。尽管 S5 较其他土壤有较高的单株结铃数, 但霜前花率较其他土壤降低了 8.4%~16.6%, 导致籽棉产量的降低。

表 2 不同质地土壤不同灌溉水平对棉花及产量结构的影响

Table 2 Yield of cotton and yield composition relative to soil and irrigation rate

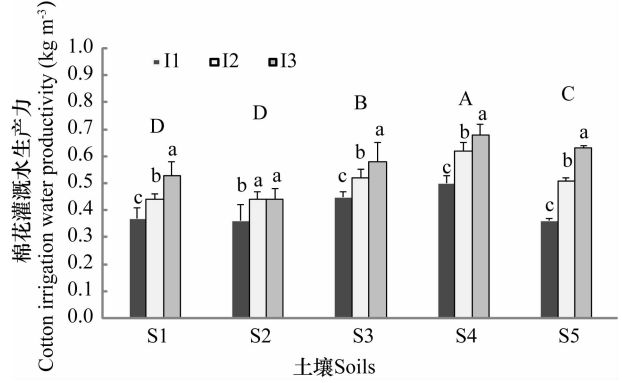
土壤 Soils	灌溉处理 Irrigation treatment	单株结铃数 Boll numbers per plant	单铃重 Boll weight (g)	衣分 Lint percentage (%)	籽棉产量 Seed cotton yield (kg hm ⁻²)	茎干生物量 Straw biomass, (kg hm ⁻²)	霜前花率 Ratio of yield before frost (%)
S1	I1	6.40 ± 0.53a	3.86 ± 0.18	42.1 ± 1.1	2 031 ± 233	2 226 ± 39	91.8 ± 0.4
	I2	5.27 ± 0.50b	4.17 ± 0.12	40.6 ± 0.6	2 268 ± 104	2 172 ± 40	90.5 ± 1.7
	I3	5.60 ± 0.00ab	3.58 ± 0.23	40.0 ± 2.7	1 992 ± 217	2 210 ± 63	90.5 ± 1.7
S2	I1	6.33 ± 0.64	3.15 ± 0.07	42.1 ± 1.5	2 088 ± 437	2 633 ± 205	89.8 ± 1.7a
	I2	5.87 ± 0.31	3.85 ± 0.14	41.5 ± 2.0	2 228 ± 129	2 587 ± 187	86.2 ± 1.4b
	I3	6.13 ± 0.23	3.63 ± 0.06	39.8 ± 0.9	2 375 ± 200	2 438 ± 89	85.5 ± 2.1b
S3	I1	7.40 ± 0.53	3.38 ± 0.08	43.3 ± 2.0	2 541 ± 131	2 714 ± 232	89.5 ± 1.2
	I2	7.33 ± 0.23	4.25 ± 0.16	41.6 ± 2.6	2 647 ± 175	2 505 ± 18	86.2 ± 0.5
	I3	7.00 ± 0.35	3.83 ± 0.12	43.1 ± 0.9	2 630 ± 147	2 438 ± 89	85.5 ± 4.5
S4	I1	7.80 ± 0.35	4.70 ± 0.05	39.8 ± 0.9	2 862 ± 195	4 018 ± 80a	83.2 ± 3.1
	I2	7.80 ± 0.53	4.29 ± 0.19	40.6 ± 0.8	3 176 ± 141	2 858 ± 170b	86.2 ± 0.5
	I3	7.87 ± 0.12	4.10 ± 0.12	40.6 ± 0.5	3 051 ± 163	3 048 ± 147b	88.1 ± 0.2
S5	I1	8.87 ± 0.42a	3.22 ± 0.14	41.4 ± 1.8	2 052 ± 28c	4 860 ± 172a	70.2 ± 1.6c
	I2	7.60 ± 0.20b	3.70 ± 0.10	40.6 ± 2.0	2 596 ± 59b	3 742 ± 222b	74.8 ± 1.1b
	I3	7.53 ± 0.50b	3.76 ± 0.13	41.0 ± 1.9	2 822 ± 66a	3 324 ± 50c	78.2 ± 0.9a
处理平均值 Mean							
土壤 Soil	S1	5.76c	3.84b	40.9b	2 097d	2 269e	91.0a
	S2	6.11c	3.53b	41.1ab	2 230cd	2 553d	87.2b
	S3	7.24b	3.82b	42.7a	2 606b	2 702c	85.8c
	S4	7.82a	4.36a	40.3b	3 030a	3 308b	83.3c
	S5	8.00a	3.56b	40.0b	2 490bc	3 976a	74.4d
灌溉 Irrigation							
	I1	7.36a	3.66b	41.4	2 315b	3 290a	83.1b
	I2	6.77b	4.05a	40.6	2 583a	2 773b	84.5a
	I3	6.83b	3.77b	41.0	2 574a	2 821b	85.5a
交互效应 Interactions (土壤 × 灌溉) (S × I)							
		NS	NS	VNS	*	***	***

注:表中不同字母表示不同土壤之间和灌溉处理之间棉花产量及产量构成因素的差异显著性 ($p < 0.05$) Note: The different letters show significant differences ($p < 0.05$) in yield of seed cotton, biomass and yield components between the five soils and between the three irrigation levels

2.3 土壤性状与灌溉水平对棉花灌溉水生产力的影响

棉花灌溉水生产力介于 $0.36 \sim 0.68 \text{ kg m}^{-3}$, 最高值出现在土壤 S4 节水 21.0% (I3) 的处理 (图 3)。灌溉量对棉花 IWP 有极显著影响 ($F = 81.22, p < 0.0001$), 不同土壤平均, 两个节水灌溉处理 I1 和 I2 较常规灌溉, IWP 提高了 0.10 kg m^{-3} 和 0.16 kg m^{-3} , 提高幅度分别为 24.4% 和 39.0%。不同质地的土壤棉花 IWP 有显著的差异 ($F = 36.4, p < 0.0001$), 两个砂土 (S1, S2) 的灌溉水生产力 (0.41 kg m^{-3} 和 0.44 kg m^{-3}) 显著低于壤砂土 (S3) 和砂壤土 (S4, S5)。土壤与灌溉水平对棉花 IWP 存在显著的交互效应 ($F = 2.91, p = 0.016$)。

回归分析进一步表明了灌溉与土壤性状对棉花 IWP 的显著影响, 在三个灌溉水平下, 棉花 IWP 随耕层 (0~20 cm) 土壤有机质含量及 0~100 cm 土层平均黏粉粒含量的增加而增加, 但 0~100 cm 剖面土壤黏粉粒含量达到 30% 以上时, IWP 生产力下降, 回归关系可用多项式很好地拟合 (图 4)。



不同大写字母表示 5 种不同土壤之间棉花灌溉水生产力的差异显著性 ($p < 0.05$); 不同小写字母表示同一土壤不同灌溉处理之间棉花灌溉水生产力的差异显著性 ($p < 0.05$)

The capital letters show significant differences ($p < 0.05$) in cotton irrigation water productivity across soils. The lowercase show the significant differences ($p < 0.05$) in cotton irrigation water productivity between the irrigation treatments in each soil

图 3 不同质地土壤不同灌溉水平的棉花灌溉水生产力

Fig. 3 Cotton irrigation water productivity relative to irrigation rate and soil

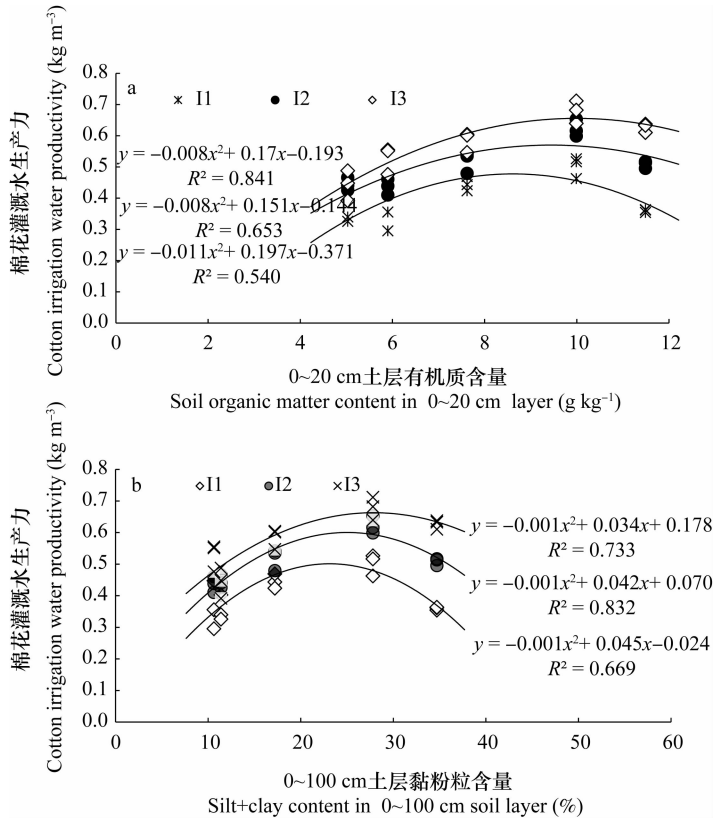


图 4 棉花灌溉水生产力与土壤有机质和黏粉粒含量的关系

Fig. 4 Relationships of cotton irrigation water productivity with organic matter content and silt + clay content in the soil

3 讨论

作物生物量和产量的形成是水、肥等多因素综合作用的结果。本项研究的结果表明了灌溉与土壤条件对棉花地上生物量的积累、叶面积指数及产量的显著影响。对一些作物如马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 和藜谷 (*Chenopodium quinoa* Willd) 的研究表明,与亏缺灌溉比较,充分灌溉可促进作物对养分的吸收及茎叶生长,提高光辐射利用率、有利于干物质的形成和产量的提高^[4,12]。但对棉花的试验发现,尽管在充分灌溉下,单株生物量、叶面积指数及收获时的茎叶生物量均高于节水灌溉,但籽棉产量节水灌溉高于常规充分灌溉。这一方面说明,在施足肥料的情况下,充分灌溉(即高水高肥条件)可促进棉花的营养生长,但过旺的营养生长限制了生殖生长,并非完全有利于产量的形成;另一方面,充分灌溉,尤其是在传统的漫灌方式下,会加剧养分的淋溶损失,影响产量的形成^[12,19]。已有的研究也表明,棉花经过长期进化已经适应了偏旱的环境,土壤供水条件应与棉花的生物学需求一致,供水太多反而不利于棉花增产^[20]。王平等^[21]在新疆的研究表明,与传统充分灌溉相比,在减少单次灌溉量、增加灌溉次数,灌溉总量减少 33%~35% 的优化灌溉管理下,棉花产量持平甚至有所提高。这表明通过优化灌溉是可以实现棉花节水与稳产增产的协调。

但不同土壤对不同灌溉处理下的棉花生物量和产量有不同的响应。持水能力极差的砂土和壤砂土 (S1、S2、S3) 在常规充分灌溉下水分渗漏损失严重,也导致养分的淋溶损失^[19]。因此,尽管砂土棉花生物量常规灌溉高于节水灌溉,但差异并不显著,籽棉产量的差异也不显著,甚至常规灌溉低于节水灌溉 (S2、S3)。砂壤土 (S4、S5) 有相对较好的持水和保肥性能,在充分灌溉下土壤水分保持时间相对较长,有利于棉花对养分的吸收利用,营养生长旺盛;但在研究区域 8 月底至 10 月初的棉花吐絮期也是降雨量比较集中的时期,积温低,在高水肥条件下,土壤肥力与持水能力较好的砂壤土 (S5) 棉花营养生长过旺迟滞了生殖生长。对棉花产量构成分析,尽管常规灌溉较节水灌溉棉花结铃数增加,但霜前花率显著降低,近 30% 的棉铃不能正常吐絮,导致砂壤土 (S5) 在常规灌溉下茎叶生物量显著高于节水灌溉,而籽棉产量却显著低于节水灌溉。从节水、高效综合考虑,黑河中游边缘绿洲区土壤肥力较高、结构发育良好的砂壤土和

壤土并不适宜于棉花生产。

大量研究表明,通气、持水和保肥性能良好的壤土较黏土和砂土有利于根系发育、养分和水分吸收利用,因而有较高的作物产量和水生产力。在印度的一项研究表明,在粉壤土上小麦、玉米的产量较壤砂土分别提高 14% 和 22%;小麦和玉米水生产力分别提高 8.7% 和 6.1%^[14]。Razzaghi 等^[12]在丹麦的一项研究表明,在充分灌溉下藜谷在砂土上的产量较砂壤土和砂黏壤土分别低 30.4% 和 43.5%。对马铃薯的研究表明,壤砂土的块茎产量显著高于砂壤土和砂土,土壤质地和灌溉水平对马铃薯水生产力有显著的交互效应,亏缺灌溉下砂土和砂壤土的马铃薯水生产力较充分灌溉提高了 5% 和 36%,但壤砂土却降低了 13%^[4]。在意大利的长期试验研究表明,甜菜 (*Beta vulgaris*)、大豆 (*Glycine max*)、番茄 (*Lycopersicon esculentum*)、玉米 (*Zea mays*)、向日葵 (*Helianthus annuus*)、马铃薯等作物在黏土上的水分利用效率较其在壤土低 22%~25%^[8];在印度棉花上的试验表明,在不同的灌溉水平下,棉花产量、ET 值及棉花灌溉水生产力壤土高于壤砂土,但棉花灌溉水生产力随灌溉量的降低而下降,且下降幅度壤砂土低于壤土^[22]。本项研究在西北干旱区棉花的试验表明,籽棉产量与 IWP,砂土显著低于砂壤土,这与上述研究在其他区域不同作物的研究结果一致。砂质土壤极低的田间持水量导致灌溉后土壤水分迅速渗漏,而黏粉粒含量相对较高的壤土在灌溉后土壤水分可以保持较长的时间。本项研究在 7 月 22 日棉花花期对不同土壤充分灌溉处理在灌溉前和灌溉后连续进行土壤水分测定,结果表明在灌溉量相同的情况下,灌溉后 1 d,0~20 cm 土层的水分含量砂土 (S1、S2) 仅为砂壤土 (S4、S5) 的 61%,灌溉后 7 d,砂土 0~20、20~40 和 0~100 cm 土层水分含量仅比灌溉前土壤含水量高 0.28%、0.64% 和 0.38%,基本接近灌溉前的水平,而砂壤土 (S4、S5) 在灌溉后 7 天 0~40 cm 的土壤含水量仍维持在较高的水平(图 5),砂壤土 (S4、S5) 0~100 cm 土层的含水量在灌溉后 7 d 较砂土平均高 18.5%,表明砂土在常规灌溉下,大量的水分通过渗漏损失,灌溉量越大,淋溶损失量越大,因此节水灌溉的 IWP 显著高于常规灌溉。从进一步提升灌溉水生产力考虑,减少单次灌溉量、增加灌溉次数应是砂土优化灌溉管理的一个重要方面;同时依据棉花不同生育期的水分需求结合土壤水分的实时监测进行灌溉水的合理分配和优化管理,节水潜力巨大^[21]。

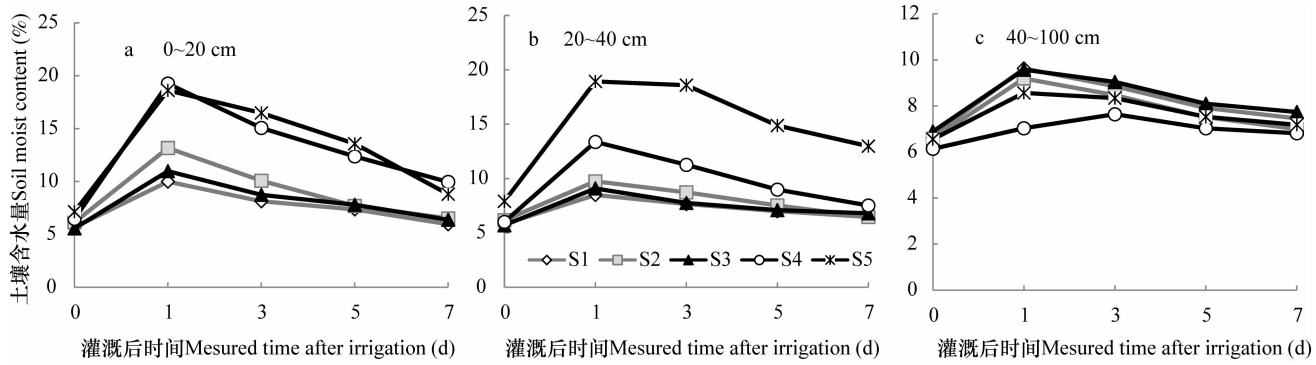


图5 不同土壤常规灌溉前和灌溉后土壤含水量的变化

Fig. 5 Changes in soil moist content of different soils before and after irrigation

4 结 论

棉花生物量形成、籽棉产量及灌溉水生产力受灌溉水平和土壤质地的显著影响。与常规充分灌溉相比,减量 10.5% 和 21.0% 的节水灌溉,尽管棉花茎干生物量有所降低,但籽棉产量增加,棉花灌溉水生产力显著提高。不同质地的土壤在不同灌溉水平下的棉花产量形成和灌溉水生产力有不同的响应。砂土和砂壤土在充分灌溉下,水分渗漏迅速,在节水灌溉下能维持甚至提高籽棉产量、IWP 提高;有机质和黏粉粒含量相对较高的沙壤土,在充分灌溉下营养生长过旺、吐絮期延后,导致霜前花率降低、籽棉产量和 IWP 降低。棉花灌溉水生产力与耕作层土壤有机质和根系分布层土壤黏粉粒含量呈多项式关系。从节水、高产和高效综合考虑,黑河中游边缘绿洲区土壤肥力较高、结构发育良好的砂壤土和壤土并不适宜于棉花生产;而新垦的砂质土壤,种植耗水量较低的棉花并进行节水灌溉管理,是实现区域节水和合理土地利用的适宜选择。

参 考 文 献

[1] Ali M H, Talukder M S U. Increasing water productivity in crop production—A synthesis. *Agricultural Water Management*, 2008, 95: 1201—1213

[2] Bossio D, Geheb K, Critchley W. Managing water by managing land: Addressing land degradation to improve water productivity and rural livelihoods. *Agricultural Water Management*, 2010, 97: 536—542

[3] Pretty J, Noble A, Bossio D, et al. Resource-conserving agriculture increasing yields in developing countries. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(4): 1114—1119

[4] Ahmadi S H, Andersen M N, Plauborg F, et al. Effects of irrigation

strategies and soils on field grown potatoes: Yield and water productivity. *Agricultural Water Management*, 2010, 97: 1923—1930

[5] 苏永中, 杨荣, 刘文杰, 等. 基于土壤条件的边缘绿洲典型灌区灌溉需水研究. *中国农业科学*, 2014, 47(6): 1128—1139. Su Y Z, Yang R, Liu W J, et al. Irrigation water requirement based on soil conditions in a typical irrigation district in a Marginal Oasis (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(6): 1128—1139

[6] 贾立华, 赵长星, 王月福, 等. 不同质地土壤对花生根系生长、分布和产量的影响. *植物生态学报*, 2013, 37(7): 684—690. Jia L H, Zhao C X, Wang Y F, et al. Effects of different soil textures on the growth and distribution of root system and yield in peanut (In Chinese). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(7): 684—690

[7] Connolly R D. Modeling effects of soil structure on the water balance of soil-crop systems: A review. *Soil and Tillage Research*, 1998, 48: 1—19

[8] Katerji N, Mastrorilli M. The effect of soil texture on the water use efficiency of irrigated crops: Results of a multi-year experiment carried out in the Mediterranean region. *European Journal of Agronomy*, 2009, 30: 95—100

[9] Arora V K, Singh C B, Sidhu A S, et al. Irrigation, tillage, and mulching effects on soybean yield and water productivity in relation to soil texture. *Agricultural Water Management*, 2011, 98: 563—568

[10] Ahmadi S H, Plauborg F, Andersen M N, et al. Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Root distribution. *Agricultural Water Management*, 2011, 98: 1280—1290

[11] 李潮海, 李胜利, 王群, 等. 不同质地土壤对玉米根系生长动态的影响. *中国农业科学*, 2004, 37: 1334—1340. Li C H, Li S L, Wang Q, et al. Effect of different textural soils on root dynamic growth in corn (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37: 1334—1340

[12] Razzaghi F, Plauborg F, Jacobsen S E, et al. Effect of nitrogen and water availability of three soil types on yield, radiation use efficiency and evapotranspiration in field-grown quinoa. *Agricultural Water Management*, 2012, 109: 20—29

[13] Simmelsgaard S E. The effect of crop, N-level, soil type and

- drainage on nitrate leaching from Danish soil. *Soil and Use Management*, 1998, 14: 30—36
- [14] Jalota S K, Singh S, Chahal G B S, et al. Soil texture, climate and management effects on plant growth, grain yield and water use by rainfed maize-wheat cropping system: Field and simulation study. *Agricultural Water Management*, 2010, 97: 83—90
- [15] 刘梅先, 杨劲松, 李晓明, 等. 滴灌模式对棉花根系分布和水分利用效率的影响. *农业工程学报*, 2012, 28 (增刊 1): 98—105. Liu M X, Yang J S, Li X M, et al. Effects of drip irrigation strategy on cotton root distribution and water use efficiency (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (Suppl. 1): 98—105
- [16] 杨九刚, 何继武, 马英杰, 等. 灌水频率和灌溉定额对膜下滴灌棉花生长及产量的影响. *节水灌溉*, 2011, (3): 29—32. Yang J G, He J W, Ma Y J, et al. Effects of irrigation frequency and quota on cotton growth and yield with drip irrigation under plastic film (in Chinese). *Water-saving Irrigation*, 2011, (3): 29—32
- [17] 杜太生, 康绍忠, 王振昌, 等. 隔沟交替灌溉对棉花生长、产量和水分利用效率的调控效应. *作物学报*, 2007, 33 (12): 1982—1990. Du T S, Kang S Z, Wang Z C, et al. Responses of cotton growth, yield, and water use efficiency to alternate furrow irrigation (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33 (12): 1982—1990
- [18] Ali M H, Talukder M S U. Increasing water productivity in crop production—A synthesis. *Agricultural Water Management*, 2008, 95: 1201—1213
- [19] 苏永中, 张智慧, 杨荣. 黑河中游边缘绿洲沙地农田玉米水氮配合试验研究. *作物学报*, 2007, 33 (12): 2007—2015. Su Y Z, Zhang Z H, Yang R. Amount of irrigation and nitrogen application for maize grown on sandy farmland in the marginal oasis in the middle of Heihe River basin (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33 (12): 2007—2015
- [20] Tewolde H, Fernandez C J, Foss D C, et al. Critical petiole nitrite-nitrogen for lint yield and enhanced maturity in Pima cotton. *Agronomy Journal*, 1995, 87: 223—227
- [21] 王平, 陈新平, 田长彦, 等. 不同水氮管理对棉花产量/品质及养分平衡的影响. *中国农业科学*, 2005, 38 (4): 761—769. Wang P, Chen X P, Tian C Y, et al. Effect of different irrigation and fertilization strategies on yield, fiber quality and nitrogen balance of high-yield cotton system (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38 (4): 761—769
- [22] Jalota S K, Sood A, Chahal G B S, et al. Crop water productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) system as influenced by deficit irrigation, soil texture and precipitation. *Agricultural Water Management*, 2006, 84: 137—146

EFFECTS OF WATER-SAVING IRRIGATION ON COTTON YIELD AND IRRIGATION WATER PRODUCTIVITY RELATIVE TO SOIL CONDITIONS

Su Yongzhong Yang Rong Yang Xiao Wang Ting Wang Min

(Linze Inland River Basin Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences/Key Laboratory of Eco-Hydrology in Inland River Basin, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract A field experiment was carried out in the oasis at the edge of the mid-reaches of the Heihe River to determine effects of water-saving irrigation on cotton yield and irrigation water productivity (IWP) in different soil conditions. The objective of the work is to provide some scientific basis for rationalizing the utilization of agricultural soil and formulating soil-specific irrigation strategies in the region. The experiment was designed to have five different types of soils, (sand soils, S1 and S2, loamy sand soil, S3, and sandy loam soil, S4 and S5) forming gradients in soil fertility and mechanical composition and three irrigation levels (conventional full irrigation (I1), 10.5% and 21.0% less water-saving irrigations (I2, I3)). The results of the experiment show that compared with Treatment I1, Treatments I2 and I3 were a bit lower in biomass of shoots and leaf area of a single plant at any growth stages and in biomass of stem at the harvesting stage, but 11.6% and 11.2% higher in yield of seed cotton, respectively. The average cotton IWP was 0.51 kg m⁻³ and 0.57 kg m⁻³ in Treatments I2 and I3, respectively, and increased by 24.4% and 39.0% relative to the IWP (0.41 kg m⁻³) in Treatment I1. Besides, treatments different in soil texture varied sharply in shoot biomass, leaf area, yield of seed cotton and yield components, as well as cotton IWP. With increasing soil organic matter (SOM) content and clay + silt content, yield of seed cotton and IWP increased, but decreased in Treatment S5 which was the highest in organic matter and silt + clay contents, displaying a polynomial relationship. Significant interactions between soil texture and irrigation rate were observed in their effects on pre-frost lint yield, biomass and seed cotton yield. In Treatment S5, Treatment I1 brought about over-flourishing vegetative growth of the crop and delayed the boll-opening stage, thus leading to reduction of the

pre-frost flower ratio, seed cotton yield and IWP, while Treatments I1 and I2. significantly increased crop IWP. In oases at the edge of deserts deficient in water resources, cultivation of cotton with low water requirement in newly reclaimed land of sandy soil and adoption of water-saving irrigation management should be an optimal option to realize regional water conservation and reasonable land use.

Key words Soil texture; Conventional irrigation; Water-saving irrigation; Cotton yield; Irrigation water productivity

(责任编辑:汪叔生)