

膜下滴灌条件下根区水分对棉花根系生长及产量的调节

罗宏海¹,朱建军^{1,2},赵瑞海¹,韩春丽¹,张旺锋^{1*}

(1.新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室/石河子大学农学院,石河子 832003;

2.新疆科技政策研究所,乌鲁木齐 830011)

摘要:在新疆气候生态条件下,选用对土壤水分敏感性不同的棉花品种为试材,采用土柱栽培法,探讨膜下滴灌条件下根区水分对棉花根系生长与活性及产量的调节作用。结果表明:滴水前耕层土壤相对含水量在 50%~55%、滴水后可保持在 70%~75% 的根区水分环境下,棉花根系的生长发育进程受到了一定程度的抑制,根系生物量降低,但提高了 40~100 cm 土层根系分布的比例和根系活力,降低了根冠比,提高了经济系数,最终产量增加。不同品种对滴水量的反应差异较大,新陆早 8 号在常规滴灌和充分滴灌量下,子棉产量高于新陆早 6 号;在限量滴灌量下则显著低于新陆早 6 号。因此,依据不同品种对水分反应的差异,在滴水周期为 7~8 d、滴水定额为 375~450 m³·hm² 的条件下,结合滴灌棉田土壤水分可控性强的特点,制定相应的灌溉制度,可实现膜下滴灌棉田节水高产高效。

关键词:棉花;根区水分;根系生长;产量;膜下滴灌

中图分类号:S562.071 **文献标识码:**A

文章编号:1002-7807(2010)01-0063-07

Effect of Water Content in Root Zone on Root Growth and Yield of Cotton under Drip Irrigation with Film Mulching

LUO Hong-hai¹, ZHU Jian-jun^{1,2}, ZHAO Rui-hai¹, HAN Chun-li¹, ZHANG Wang-feng^{1*}

(1.Key Laboratory of Oasis Eco-agriculture of Xinjiang Production and Construction Group/College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2.Xinjiang Institute for Policy of Science and Technology, Urumqi 831100, China)

Abstract: A soil column culture experiment was conducted under the ecological and climatic conditions of Xinjiang to study the effect of water content in root zone on root growth, vigour and yield of cotton with the cultivars of different water-sensitivity Xinluzao 6 and Xinluzao 8 under drip irrigation with film mulching. The results indicated that the water content in root zone of 50%~55%, respectively, of field water-holding capacity before drip and 70%~75% after drip inhibited root growth and reduced root biomass. However, the root vigour and biomass in layer of 40~100 cm were enhanced under the water content condition. Furthermore, it reduced the root/shoot ratio and increased economic index that led to high yield of cotton. The differences of response to drip irrigation among varieties were great, seed yield of Xinluzao 8 was higher in convention and sufficiency drip irrigation than that of Xinluzao 6, however, under limited drip irrigation Xinluzao 8 was significantly lower than Xinluzao 6. It will be of great importance to institute the optimum irrigation schedule under the condition that the dripping cycle is 7~8 d and the dripping quantity is 375~450 m³·hm², according to the differences of response to soil moisture content among varieties for abstaining high yield and high water use efficiency.

Key words: cotton; water content in root zone; root growth; yield; drip irrigation with film mulching

根系是作物吸收水分和养分的主要器官,其生长发育和土壤水分密切相关,通过改变土壤水分状况及其分布,调节根系生长,可调节作物向

高产和高水分利用效率方向转变^[1-2]。已有研究表明,调亏灌溉下根系生物量减少,但根冠比和根系活力提高,说明调亏在量上抑制根系生长,但

收稿日期:2009-05-08 **作者简介:**罗宏海(1979-),男,博士,副教授,luohonghai79@gmail.com; * 通讯作者

基金项目:国家自然科学基金项目(30460063),教育部科学技术研究重点项目(地方 02181),新疆生产建设兵团博士资金项目和石河子大学高层次人才启动计划项目(RCZX200809)

在形态和功能上有补偿作用^[3];根区交替灌水使根系总量和根冠比增加,根系分布均匀,水分利用效率显著增加^[4];上层干旱下层湿润的水分环境使作物具有发达的根系^[5],保持了较旺盛的生长活力^[6],产量及水分利用效率显著提高^[7]。因此,如何通过农田水分调控措施,调节作物根系生长,进而调节地上部生长,实现农业水资源高效利用,已成为现代灌溉农业研究中的热点和难点问题之一。新疆属于典型的无灌溉即无农业的内陆干旱区,光热资源丰富,具有发展棉花的资源优势,然而水资源不足已成为制约新疆农业生产的核心因素,发展节水灌溉是新疆农业可持续发展的根本出路。目前,新疆推广的大田作物膜下滴灌技术将先进的栽培方式和滴灌技术相结合,不仅提高了农田水肥的可控性,为作物根系生长创造了良好的水分和养分环境,而且为根系调控技术的研究提供了新的思路和方法。如何利用膜下滴灌技术可人为高精度控水的特点,探寻通过控制根区土壤水分供应,调节根系生长,进而调节地上部生长,最终提高棉花经济产量是实现膜下滴灌棉花高产高效的重要研究内容^[8-9]。为此,本试验在新疆气候生态条件下,选用对水分敏感程度不同的棉花品种为试材,采用土柱试验方法,通过膜下滴灌精确控制生育期间土壤水分的供应,研究根区水分变化对膜下滴灌棉花根系生长与活力及产量的调节效应,旨在明确根区水分变化对棉花产量的影响机理,以期为棉花超高产和以土壤水和作物关系为中心的农田水分调控提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验在新疆石河子大学农学院试验站进行。参试品种为两个对水分敏感程度不同的新陆早6号和新陆早8号^[10]。采用土柱的试验方法,设3个滴水量处理,每次滴水量均为 $375\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$:①以新疆大田膜下滴灌棉花滴水定额为常规滴灌处理(滴水量为 $3750\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$),全生育期共滴水10次;②减少滴水定额 $1/3$ 为限量滴灌处理(滴水量为 $2550\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$),全生育期共滴水6次;③增加滴水定额 $3/5$ 为充分滴灌处理(滴水量为 6000

$\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$),全生育期共滴水16次。采用裂区试验设计,滴水量处理为主区,品种为副区,随机排列,每处理18个重复。

试验采用的土柱外层为沥青油毡纸、内层为防渗膜,直径40 cm、高100 cm。桶柱制作完成后,排放好放入挖好的高100 cm的方形土坑中,柱桶底部用防渗膜封底,排列行距与大田相同(30 cm+60 cm+30 cm),按照田间土壤状况(土壤有机质含量 $19.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.91\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $72.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $43.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $200.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)装土入柱。土柱周围用土填实,播种前1个月进行灌水沉实,使土柱与大田状况尽可能一致。播种日期依据本地气候条件,于4月25-27日在土柱上布滴灌带、铺膜后,人工点播,每柱内外行各播4穴(株距为10 cm),每穴2~3粒种子,出苗后2叶期每穴定1株,棉花生长期间及时灭草和防治病虫害。滴水量用水表和球阀控制。水分处理从6月7日开始,在第1次、第2次滴水时随水施入尿素每公顷225 kg,其它管理措施同大田膜下滴灌棉花。

1.2 测试项目及方法

土壤水分主要采用中子水分测试仪(美国CPN公司503DR)测定,并在滴水前和滴水后1 d采用烘干法对其测定值进行校正。中子水分测试仪的探测铝管埋深100 cm,测定时按垂直方向每10 cm测一个样点,采用美国CPN公司生产的、ICT公司为之配套的PROBE灌溉决策软件,通过换算公式和校正系数可换算成土壤相对含水量来表示灌水前后土壤水分的变化情况。

于盛蕾期、盛花期、铃期、盛铃期、吐絮期等关键生育时期,相应为出苗后50、70、90、110、130 d进行取样,每处理重复3次。取样后,将植株地上部分分为茎、叶、蕾铃等不同器官,鲜样于 105°C 杀青30 min后 80°C 烘48 h,称干质量。地下部分调查时,先将土柱挖出,每隔10 cm为一层面分段截取,取适量鲜根低温保存用于室内测定。取根系烘干,测定根系干质量;根系活力测定参照张志良^[11]的方法;成熟期收样,进行室内考种,以实收产量计产。

1.3 数据处理

数据采用DPS 10.0软件,Duncan多重比较

法进行统计分析。作图采用 Sigmaplot 9.0 完成。

2 结果与分析

2.1 不同滴水量对棉花根区水分的影响

不同滴水量处理,一个滴水周期内土壤水分的动态变化结果见图 1。滴水后 2 d,限量滴灌、常规滴灌和充分滴灌量处理在土壤耕层内(40 cm 以内)相对含水量分别保持为 65%、70%和 85%以上;水后 4 d,限量滴灌量处理在耕层内相对含

水量降至 60%以下,常规滴灌量处理则在 60%~65%,充分滴灌量处理可保持在 80%左右。水后 6 d,限量滴灌和常规滴灌量处理在耕层内相对含水量均降低至 55%,接近棉花需水的临界值;水后 10 d 以后,常规滴灌量处理耕层内的相对含水量可保持在 50%~52%,限量滴灌量处理已降低至 40%左右。可见,滴水周期越长,棉花根区水分减少幅度越大,干旱胁迫程度加重。

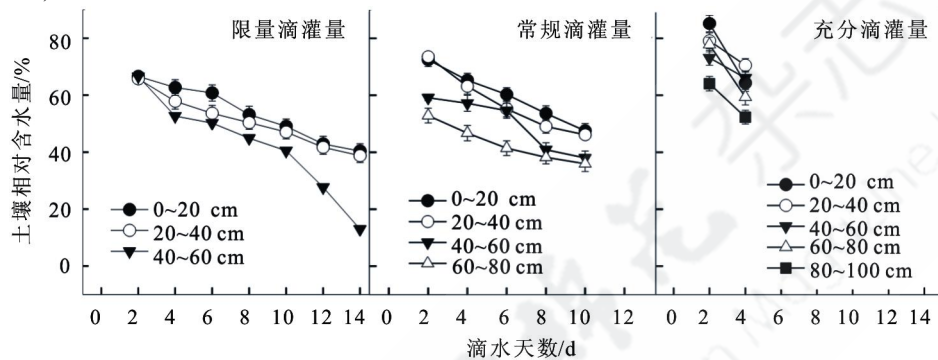


图 1 不同滴水量对棉花根区水分的影响

Fig. 1 Effect of different drip irrigation on relative soil water content

2.2 根区水分对棉花根系生长的影响

根系生物量是分析根系生长最常用的指标之一。试验表明,棉花单株根量随生育时期的推移均呈明显的增加趋势(表 1),随滴水量的增加而增加。以充分滴灌量条件下新陆早 6 号最高,限量滴灌量新陆早 8 号最低。品种间,新陆早 6 号充分滴灌和限量滴灌量条件下根系生物量高于新陆早 8 号,常规滴灌量下低于新陆早 8 号。

对不同处理用 Logistic 曲线 $y=A/(1+axe^{-bx})$ 拟合显著性检验为显著或极显著。两品种在不同滴水量条件下,根系的线性增长期随滴水量的增加而延长,以充分滴灌条件下新陆早 6 号较长,限量滴灌条件下新陆早 8 号最短;进入线性增长期时间随滴水量的增加而提前,其中充分滴灌量处理进入线性增长期的时间比其它两处理早 10~15 d,说明根区水分充足有利于促进根系发育,根区

表 1 棉花根系生物量和生长模型

Table 1 Cotton root growth models with different drip irrigation

$g \cdot \text{株}^{-1}$

出苗后天数/d	新陆早 6 号			新陆早 8 号		
	限量滴灌量	常规滴灌量	充分滴灌量	限量滴灌量	常规滴灌量	充分滴灌量
50	1.88	2.49	3.73	1.45	3.18	3.79
70	3.05	4.23	5.25	2.84	4.32	4.91
90	4.94	5.78	7.16	3.97	5.83	6.88
110	5.65	6.82	8.02	4.62	6.95	7.84
130	5.96	7.35	9.12	4.74	7.48	8.72
参数						
A	6.25	7.74	10.15	4.89	8.23	9.73
a	36.4	20.65	9.18	56.21	11.64	10.15
b	0.053	0.046	0.033	0.063	0.038	0.036
R	0.995**	0.999**	0.997**	0.996**	0.989*	0.991**
t_1	43	37	27	43	30	28
t_2	93	95	106	85	99	102
t_3	50	58	79	42	69	74

注: t_1 为进入线性增长期时期, t_2 为线性增长期结束期, t_3 为线性增长期。

水分亏缺引起棉花受到水分胁迫时,根系的生长发育进程缓慢,生物量明显降低。

分析不同滴水量条件下棉花根系在垂直土层中的分布比例表明(表 2),0~20 cm 土层内,根量分布的比例表现为充分滴灌量 > 常规滴灌量 > 调亏滴灌量处理,且处理间均达到显著性差异;0~40 cm 土层内,调亏滴灌量处理根量分布的比例显著低于其它两个处理,充分滴灌和常规滴灌量之间无明显差异;40 cm 以下土层内调亏滴灌量处理根量分布的比例显著高于其它两个处理,说明随滴水量的增加,浅层土中根量分布增多,深层土中根量分布减少;当耕层水分较少的情况下,分布在深层中根量的比例增加。品种间,新陆早 6 号在限量滴灌量条件下根系在 40 cm 以下土层内分布的比例显著高于新陆早 8 号,在常规

滴灌和充分滴灌量条件下显著低于新陆早 8 号。

2.3 根区水分对棉花根系活力的影响

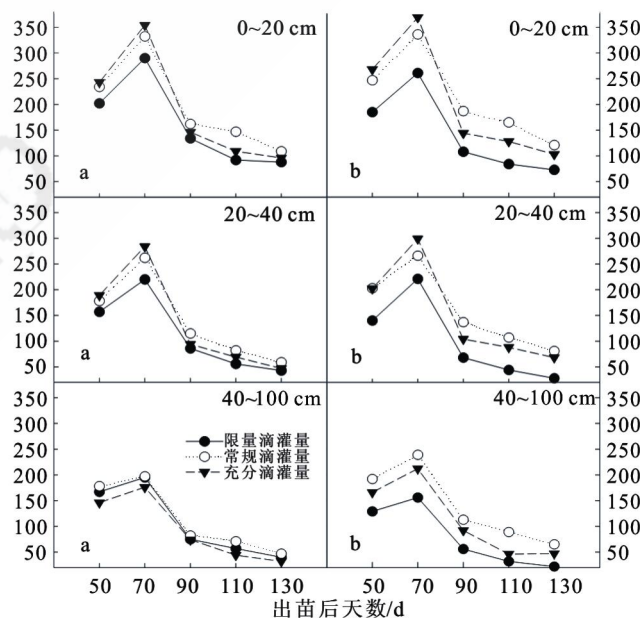
TTC 还原强度即每克鲜根单位时间内还原 TTC、生成三苯基甲簪的量,是衡量根系活力大小的重要指标。根区水分对棉花根系活力有明显的影响(图 2),在整个生育期内根系活力的动态变化呈单峰型曲线,均在花后 70 d 达到峰值;土层间随土层深度的增加而减小,以 0~20 cm 土层根系活力最高。不同处理间,在盛花期根系活力达峰值之前,0~40 cm 土层根系活力随滴水量的增加而增加,40~100 cm 土层根系活力以常规滴灌量处理较高;峰值过后,常规滴灌量的根系活力在整个土层均高于充分滴灌和限量滴灌量处理。不同品种对滴水量反应不同。新陆早 8 号较新陆早 6 号对限量滴灌量反应敏感,表现为根区水分

表 2 根区水分对棉花根系在垂直土层中分布比例的影响

Table 2 Effect of water content in root zone on the proportion of vertical distribution of cotton root biomass

品种	处理	土层深度/cm		
		0~20	0~40	40~100
新陆早 6 号	限量滴灌量	64.68c	73.02b	31.98a
	常规滴灌量	76.68b	91.52a	8.48d
	充分滴灌量	84.05a	93.40a	6.60e
新陆早 8 号	限量滴灌量	68.63c	78.30b	21.70b
	常规滴灌量	76.50b	89.18a	11.85c
	充分滴灌量	81.95a	90.65a	9.23c

注:字母 a、b、c 表示同一列在 P=0.05 水平上差异显著;下同。



a: 新陆早 6 号 b: 新陆早 8 号

图 2 根区水分对棉花根系活力的影响

Fig. 2 Effect of water content in root zone on cotton root vigour at different growth stages

亏缺,根系活力明显降低,且生育后期下降快。常规滴灌和充分滴灌量条件下,新陆早 6 号的根系活力在盛花期以前与新陆早 8 号无明显差异,进入盛铃期后迅速下降,低于新陆早 8 号。与新陆早 6 号相比,新陆早 8 号在常规滴灌和充分滴灌量条件下根系活力的变化较为平稳。

2.4 根区水分对棉花根冠比的影响

土壤水分不仅影响根系生长发育及生理功能,还会改变植株器官间的生长进程,特别是根冠比。试验表明,根冠比的生育期变化表现为盛蕾期较高,随生育进程的推移逐渐减小,至吐絮期减至最小(图 3)。不同滴水量条件下棉花根冠比存在明显差异,限量滴灌和常规滴灌量处理由于滴水周期长,滴水前棉花受到了水分胁迫,促使有限的光合产物优先向根系分配,根冠比变大;充分滴灌处理滴水周期短,根区水分充足,地上部生长旺盛,根冠比较低。品种间,无论在何种滴水量条件下,新陆早 8 号的根冠比均高于新陆早 6 号。

2.5 根区水分对棉花产量及其构成因子的影响

不同滴水量条件下,棉花子棉产量以常规滴灌量最高。其中,新陆早 8 号子棉产量达 5682.39 kg·hm⁻² 的高产水平,其次为充分滴灌量,限量滴灌量处理的最低(表 3)。进一步考察其产量构成因素,单株结铃数随滴水量的增加而增加,充分滴灌与常规滴灌量处理无显著差异,但均与限量滴灌量达到了显著性差异;铃重则表现为常规滴灌量处理最高,且与充分滴灌和限量滴灌量处理均达到了显著性差异。充分滴灌处理棉花生物产量最高,但经济系数较低,表明同化物向生殖器官分配的比例低,棉株徒长;限量滴灌虽提高了经济系数,但终因单株结铃数显著降低,产量水平较低;常规滴灌未增加生物产量,但提高了经济系数,说明常规滴灌的增产作用主要是通过提高同化物向经济器官蕾铃分配的比例,增加铃重而实现。品种间,新陆早 8 号在常规滴灌和充分滴灌量条件下产量均高于新陆早 6 号,限量滴灌量条件下显著低于新陆早 6 号。

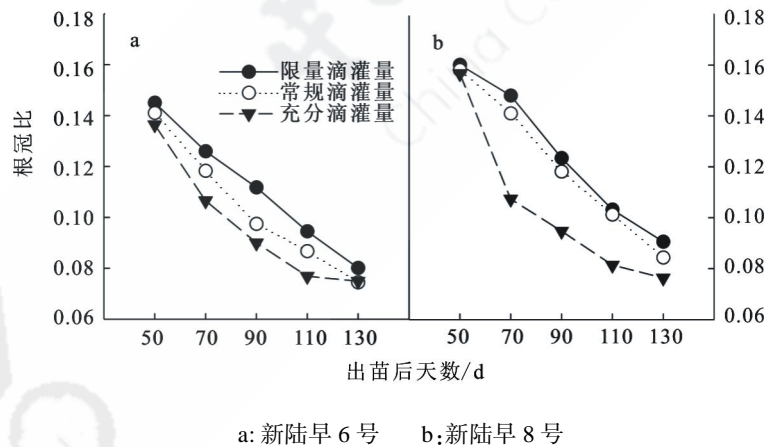


图 3 根区水分对棉花根冠比的影响

Fig. 3 Effect of water content in root zone on cotton root/shoot at different growth stages

表 3 根区水分对棉花产量及产量构成因子的影响

Table 3 Effect of water content in root zone on cotton yield and yield components

品种	处理	单株结铃数 /个	铃重 /g	子棉产量 /(kg·hm ⁻²)	生物产量 /(kg·hm ⁻²)	经济系数
新陆早 6 号	限量滴灌量	4.21b	5.58b	3603.78d	16864.21c	0.21ab
	常规滴灌量	5.30ab	6.22a	5470.03a	22272.64b	0.25a
	充分滴灌量	6.22a	4.74b	4972.36b	27486.92a	0.18b
新陆早 8 号	限量滴灌量	3.00c	5.21b	3260.57c	14988.00c	0.22b
	常规滴灌量	5.36a	6.49a	5682.39a	20199.93b	0.28a
	充分滴灌量	6.37a	4.96b	5053.88b	25821.65a	0.19b

3 讨论

3.1 膜下滴灌条件下根区水分变化对棉花根系生长及分布具有明显的调节效应。限量滴灌和常规滴灌量处理滴水前土壤耕层内相对含水量在40%~55%，棉株受到了轻度至中度的水分胁迫，滴水后可保持在65%~75%的根区水分环境，缩短了根系生长发育期，降低了根系生物量，且显著增加了根系在深层土中分布的比例；充分滴灌量处理由于滴水周期短，根区水分充足，滴水前后土壤耕层中相对含水率的变化幅度不大，均保持在80%~85%，促进了根系的生长发育，根系进入线性增长期提前，根系生长的高峰期延长，进而根系生物量增加，且根系在浅层土壤分布的比例显著增加。不同品种对根区水分变化的响应不同。新陆早6号在限量滴灌量条件下根系生物量及深层土中分布的比例均显著高于新陆早8号，这可能是新陆早6号对限量滴灌反应不敏感的原因之一。

3.2 肖凯等研究表明，根系活力与春小麦群体光合速率在春季各生育时期尤其是生育后期均呈高度正相关，表明根系生理功能强弱与地上部群体光合能力乃至群体物质生产能力有紧密的联系^[2]。本试验表明，常规滴灌条件下根系的生长发育受到了影响，但显著提高了40~100 cm土层中根系分布的比例及根系活力，有利于增加根系对深层土壤中的水分和养分的吸收^[13-14]。生育后期根系活力下降缓慢有利于延缓叶片衰老^[15]，从而延长产量形成期，提高棉花产量。

3.3 根区水分通过对棉花根系生长、活力和地上部分的影响，最终影响产量及产量构成。不同滴水量条件下棉花生物产量、经济产量及产量构成因素差异显著。随着滴水量的增加，棉花生物产量增加，充足的灌溉有利于生物产量的形成，但同化物向营养器官分配的比例过高，增加了根冠比，降低了经济系数。限量滴灌量处理抑制了棉花生长，且地上部生长受到抑制程度超过根系，引起根冠比过大，虽然经济系数较高，但单株结铃数、铃重下降幅度过大，经济产量较低。因此，滴水周期在7~8 d、每次滴水量为375~450 m³·hm⁻²条件下，依据不同品种对水分敏感性的差

异，结合滴灌棉田土壤水分可控性强的特点，制定相应的灌溉制度，通过调节根系的生长及生理活性，进而调节地上部生长发育，对实现膜下滴灌棉田节水、高产和高效具有重要意义。

参考文献:

- [1] 冯广龙, 罗远培. 土壤水分与冬小麦根、冠功能均衡关系的模拟研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 96-103.
FENG Guang-long, Luo Yuan-pei. Simulation on functional equilibrium of winter wheat root and shoot under different soil water regimes[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 96-103.
- [2] 李运生, 王 菱, 刘士平, 等. 土壤-根系界面水分调控措施对冬小麦根系和产量的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(10): 1680-1687.
LI Yun-sheng, Wang Ling, Liu Shi-ping, et al. The influence of different amounts of water supplied at different depths in soil-root interface on root distribution and yield of winter wheat [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(10): 1680-1687.
- [3] 黄高宝, 张恩和. 调亏灌溉条件下春小麦玉米间套农田水、肥与根系的时空协调性研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 53-57.
HUANG Gao-bao, Zhang En-he. Coordinating of root-water-fertilizer relation of spring wheat-spring corn intercropping system under regulated deficit irrigation[J]. Transactions of the Case, 2002, 18(1): 53-57.
- [4] 梁宗锁, 康绍忠, 胡 炜, 等. 控制性分根交替灌水的节水效应[J]. 农业工程学报, 1997(4): 58-63.
LIANG Zong-suo, Kang Shao-zhong, Hu Wei, et al. Effect of controlled roots-divided alternative irrigation on water use efficiency[J]. Transactions of the Case, 1997(4): 58-63.
- [5] 李凤民, 郭安红, 雒 梅, 等. 土壤深层供水对冬小麦干物质生产的影响[J]. 应用生态学报, 1997, 8(6): 575-579.
LI Feng-min, Guo An-hong, Luo Mei, et al. Effect of water supply from deep soil on dry matter production winter wheat [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1997, 8(6): 575-579.
- [6] ENTZ M H, Gross K G, Flower D B. Root growth and soil-water extraction by winter and spring wheat[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1992, 72: 1109-1120.
- [7] MANDAL K G, Hati K M, Misra A K, et al. Assessment of irrigation and nutrient effects on growth, yield and water use efficiency of Indian mustard (*Brassica juncea*) in central India[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85: 279-286.
- [8] 危常州, 马富裕, 雷咏雯, 等. 棉花膜下滴灌根系发育规律的研究[J]. 棉花学报, 2002, 14(4): 209-214.
WEI Chang-zhou, Ma Fu-yu, Lei Yong-wen, et al. Study on cotton root development and spatial distribution under film mulch

- and drip irrigation[J]. *Cotton Science*, 2002, 14(4): 209-214.
- [9] 方怡向, 赵成义, 串志强, 等. 膜下滴灌条件下水分对棉花根系分布特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(5): 96-100.
- FANG Yi-xiang, Zhao Cheng-yi, Chuan Zhi-qiang, et al. Root distribution characteristics of cotton in different drip irrigation amounts irrigation under mulched[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(5): 96-100.
- [10] 张旺锋, 王振林, 余松烈, 等. 膜下滴灌对新疆高产棉花群体光合作用冠层结构和产量形成的影响[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(6): 632-637.
- ZHANG Wang-feng, Wang Zhen-lin, Yu Song-lie, et al. Effect of under-mulch-drip irrigation on canopy apparent photosynthesis, canopy structure and yield formation in high-yield cotton of Xinjiang[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(6): 632-637.
- [11] 张志良. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- ZHANG Zhi-liang. *Experimental guide for plant physiology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1992.
- [12] 肖 凯, 尹振君, 张荣铎. 杂种小麦根系生理活性的研究[J]. *河北农业大学学报*, 1997, 20(4): 1-5.
- XIAO Kai, Yin Zhen-jun, Zhang Rong-xian. Study on root physiological activities of hybrid wheat[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 1997, 20(4): 1-5.
- [13] 李玉山, 喻宝屏. 土壤深层储水对棉花产量效应的研究[J]. *土壤学报*, 1981, 18(4): 383-388.
- LI Yu-shan, Yu Bao-ping. Studies on the effect of water storage in deep soil horizon on the yield of cotton [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1981, 18(4): 383-388.
- [14] 刘庚山, 郭安红, 安顺清, 等. 开发利用土壤深层水资源的一种有效途径——“以肥调水”的大田试验研究[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(4): 423-429.
- LIU Geng-shan, Guo An-hong, An Shun-qing, et al. A scientific approach of using water resources in deep soil layer-farmland experimental studies of utilizing water by fertilizer[J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(4): 423-429.
- [15] 王 瑛, 王立国, 陈兵林, 等. 麦棉共生期间棉花根系的生理特性研究[J]. *棉花学报*, 2007, 19(6): 446-449.
- WANG Ying, Wang Li-guo, Chen Bing-lin, et al. study on the physiological characteristic of cotton root in the composite root population of wheat-cotton double cropping system in symbiotic period[J]. *Cotton Science*, 2007, 19(6): 446-449. ●