

黄瓜结瓜期根系伤流及其影响因素研究

韦泽秀^{1,3} 梁银丽^{1,2} 黄茂林¹ 周茂娟¹ 曾兴权³

(1. 西北农林科技大学资源环境学院; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西藏自治区农牧科学院农业研究所, 西藏 拉萨 850032)

摘要:依据水肥二因素随机区组试验,以津优1号黄瓜为试材,研究不同水肥处理黄瓜结瓜期根系及环境因素对根系伤流的影响。分析了结瓜初期、盛期和后期不同水肥组合黄瓜根系特征、伤流量、伤流强度以及土壤温度。结果表明,黄瓜一级侧根总长度和根干重随黄瓜植株生长逐渐增加,但根系伤流量和伤流强度在结瓜盛期最大;黄瓜根系伤流强度变化与气温变化极显著相关,5cm深处土壤温度对植株伤流强度的影响不大,30cm处土壤温度对伤流强度的影响最强烈;对根系伤流量直接作用的影响顺序为:根干重(-1.06323)>地上部干重(0.87366)>土壤含水量(0.59972)>一级侧根总长(0.47214)>根数量(-0.02941)。结论:不同水肥处理通过影响土壤溶液状况和土壤温度从而影响黄瓜根系生长和根系物质运输。

关键词:根系伤流强度 土壤剖面温度 通径分析*

根系是植物从土壤或溶液等外界介质中摄取养分和水分的主要器官,对植物的生长和发育起着极其重要的作用。从植物茎的基部把茎切断,由于根压作用,切口不久即流出液滴,从受伤或折断的植物组织溢出液体的现象,称为伤流。国内外大量研究证实,伤流数量和成分能表征植物生长势和根系生理活性强弱。国外学者通过研究淹水土壤中大豆根系伤流量和伤流液中氮素含量可以反映大豆根系活力强弱;孙庆泉等通过对我国不同年代玉米品种生育全程根系特性演化的研究得出:单株伤流液量可以反映根系活力的大小,根系伤流液量越大则说明根系活力越强,对地上的支持功能就越强;关于伤流量及其养分浓度与养分吸收及作物生长的研究也已经有大量研究,且主要集中于大田作物水或肥(主要是N肥)单因素对根以及植株地上部或产量的影响。有关水肥耦合处理对蔬菜根系伤流研究较少。因此,本研究通过对日光温室中不同水肥处理下黄瓜根区温度、水分、以及黄瓜根系特征等定点定期研究,探讨了灌水、施肥对黄瓜根系和根区微环境的影响,为保护地进行“以肥调水、以水调热”、合理灌水施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

该试验于2007年4月~2008年9月在中国科学院水土保持研究所安塞试验站内日光温室1米深隔水小区进行。土壤为典型的黄绵土,其土壤容重为 $1.26 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,饱和水含量30%,有机质 $9.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.518 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.636 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $3.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $26.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $240.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,PH 8.0, EC $0.18 \text{ ms} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验共设计3个土壤相对含水量水平,分别为90%~100%(Wh)、70%~80%(Wm)、50%~60%(Wl);水平肥料, $600 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} + 420 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ (Fh)和 $420 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} + 294 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ (Fl),共6个处理(WhFh、WmFh、WlFh、WhFl、WmFl和WlFl)。4次重复,小区面积 $2.4 \times 2.5 = 6.0 \text{ m}^2$ 。按滴灌带确定株距为30cm,行距为60cm。供试黄瓜为津优1号,营养钵育苗,三叶一心时移栽入日光温室。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 在小区东边2行垄面中央安装土壤剖面水分检测仪PR1(产地:英国)套管。每2d测定一次0~40cm土层的土壤水分,每20d通过取土烘干法校对土壤含水量,按水分上限确定灌水量;在小区西边2行垄面中央安装TR-51A温度记录仪,每小时自动连续

* 基金项目:中国科学院知识创新项目(KZCX2-XB2-05-01)、国家科技支撑项目(2006BAD09B07)、中日合作JSPS“中国内陆沙漠化防治及农业替代技术研究”资助。

记录 5cm、10cm、20cm、30cm 深度土壤温度;将 HOBO-032-08 型温湿度记录器固定在轻型百叶箱中固定于温室中央离地 1.5m,每小时自动采集一次数据。

1.3.2 伤流的测定。在 2007 年 6 月 21 日(黄瓜结瓜初期)、7 月 24 日(结瓜盛期)和 8 月 30 日(结瓜后期)每处理从植株基部离地 5cm 处剪断,套上内充脱脂棉的伤流袋于 09:00 到次日 09:00 每 1.5h 称重记录伤流量。

1.3.3 根系的收集。采用传统挖掘法挖掘 30cm × 30cm × 30cm 深的土方,将土方浸泡,快速冲净,泥水过 40 目筛,收集冲掉断根。一级侧根数为直接从主根生长出来的根长 ≥ 2cm 的侧根数; $L_{\text{一级侧根总长度}} = [(L_{\text{最长侧根}} + L_{\text{最短侧根}}) / 2 \times N_{\text{一级侧根数}} \times 0.618]$ 。将植株按根、茎、叶分袋 105℃ 杀青 30mins 后 70℃ 烘至恒重,得到根和地上部干重。用 7.05 DPS 数据处理系统对数据进行方差分析、多重比较、相关分析和通径分析,采用 Excel 软件作图。

2 结果分析

2.1 不同水肥处理对黄瓜根系生物量的影响

从表 1 可见,不同水肥处理黄瓜一级侧根数量随生育期变化无规律性。其中,WhFh 和 WmFh 两处理的根数量随黄瓜生长逐渐增加,在后期根数量最多,分

别为 85.5 根 · 株⁻¹, 72.5 根 · 株⁻¹; WIFh 根数量在盛期最多为 82.0 根 · 株⁻¹; WhFl、WmFl 处理在生长盛期根数量最少,分别为 67.0 根 · 株⁻¹ 和 44.0 根 · 株⁻¹,而 WIFl 处理随黄瓜生育期变化根数量逐渐减少。

一级侧根总长度(见表 1)的变化趋势与侧根数变化有相似之处,但也有所不同。Fl 各处理一级侧根总长度在盛期和后期均高于 Fh 处理,且 WIFl 处理的一级侧根长度在整个生育期都高于其它处理,表明适当的控肥利于黄瓜根系的生长。Fh 处理,在黄瓜生长初期和盛期,随灌水量的增加一级侧根总长度增加,而后期随灌水量的增加一级侧根总长度减少; Fl 处理,在黄瓜生长初期和盛期,随灌水量的增加一级侧根总长度先减少后增加,而后期各处理的一级侧根总长度无显著差异,表明在生长初期和盛期,充足的灌水在一定程度上能促进黄瓜根系生长。

黄瓜根干重(见表 1)在生育期内逐渐增加。分析侧根数、一级侧根总长度与根干重之间的相关系数分别为 $r = 0.3495, r = 0.8016^{**}$ 表明,二者均与根干重呈正相关,且一级侧根总长度与根干重相关系数达到极显著水平,可以看出,黄瓜侧根长度对根干重的影响大于根数对根干重的影响。

表 1 不同水肥处理黄瓜结瓜期根系特性

	WhFh	WmFh	WIFh	WhFl	WmFl	WIFl
初期						
根数(根/株)(root · plant ⁻¹)	57.0 ± 1.0c	43.7 ± 1.2d	43.0 ± 1.0d	88.3 ± 5.0a	70.3 ± 2.1b	74.7 ± 1.5b
侧根总长度(cm · plant ⁻¹)	569.0 ± 6.3a	366.4 ± 19.4c	214.1 ± 15.6d	529.2 ± 31.5a	474.1 ± 11.5b	579.7 ± 18.2a
根干重(g · plant ⁻¹)	1.09 ± 0.13a	0.95 ± 0.07a	0.69 ± 0.04b	1.10 ± 0.06a	0.99 ± 0.06a	1.04 ± 0.09a
根数量(根/株)(root · plant ⁻¹)	60.0 ± 4.0c	43.7 ± 1.5d	82.0 ± 2.6a	67.0 ± 1.0b	44.0 ± 2.0d	61.7 ± 3.2c
盛期						
侧根总长度(cm · plant ⁻¹)	692.1 ± 9.8c	633.3 ± 66.7cd	579.9 ± 71.3d	789.28 ± 11.5b	765.6 ± 5.8b	987.9 ± 17.1a
根干重(g · plant ⁻¹)	1.93 ± 0.12bc	1.06 ± 0.19d	2.59 ± 0.14a	2.16 ± 0.27b	1.94 ± 0.16bc	1.73 ± 0.02c
根数量(根/株)(root · plant ⁻¹)	85.5 ± 1.5a	72.5 ± 3.1b	69.5 ± 1.7b	91.0 ± 3.1a	52.0 ± 0.9c	50.5 ± 1.7c
后期						
侧根总长度(cm · plant ⁻¹)	845.4 ± 22.60c	923.2 ± 24.0b	941.4 ± 20.8b	1128.1 ± 22.4a	1097.2 ± 10.9a	1127.0 ± 15.0a
根干重(g · plant ⁻¹)	6.11 ± 0.14c	7.68 ± 0.25a	5.77 ± 0.08cd	7.90 ± 0.20a	7.00 ± 0.16b	5.54 ± 0.09d

注:同行数据比较,不同小写字母分别表示在 0.05 水平上差异显著。

2.2 不同水肥处理黄瓜根系伤流强度和伤流量变化

黄瓜根系伤流强度日变化(图 1)在结瓜初期,表现为多峰曲线,白天根系伤流强度变化大,夜晚根系伤流强度变化平缓;盛期,表现为“V”型,伤流强度在刚开始的 3 小时内有小幅度的起伏,而后降低直至 01:30, 04:30 后各处理的伤流强度逐渐增加;在后期,伤流强度呈波浪变化,变化幅度小,但各处理间差异显著。在结瓜初期、盛期和后期黄瓜根系伤流强度低—高一低变化,平均值分

别为: 3.20、5.24 和 3.41 g · (plant · 1.5h)⁻¹, 不同生育期黄瓜根系伤流强度随水、肥变化趋势相同。随土壤水分变化: Wh > Wm > Wl; 随施肥量变化, Fh > Fl; 各处理间表现为: WhFh > WhFl > WmFh > WmFl > WIFh > WIFl。

根据图 1 统计结瓜初期和盛期(09:00~21:00)、后期(8:00~20:00)黄瓜根系伤流量,结果显示,黄瓜根系伤流量随土壤含水量和肥料施用量增加而增加,在结瓜初期、盛期和后期,高肥处理比低肥处理伤流量平均增加 14.79%、13.47% 和 26.55%, 中水处理比低

水处理伤流量平均增加 23.58%、82.04%和 35.23%，高水处理比低水处理伤流量平均增加 50.55%、97.55%和 110.65%。通过不同水肥处理黄瓜根系伤流强度和伤流量分析表明：土壤含水量下降、施肥量减少则单株根系伤流强度和伤流量明显降低，黄瓜根系对土壤的水肥生态环境有很强的敏感性。

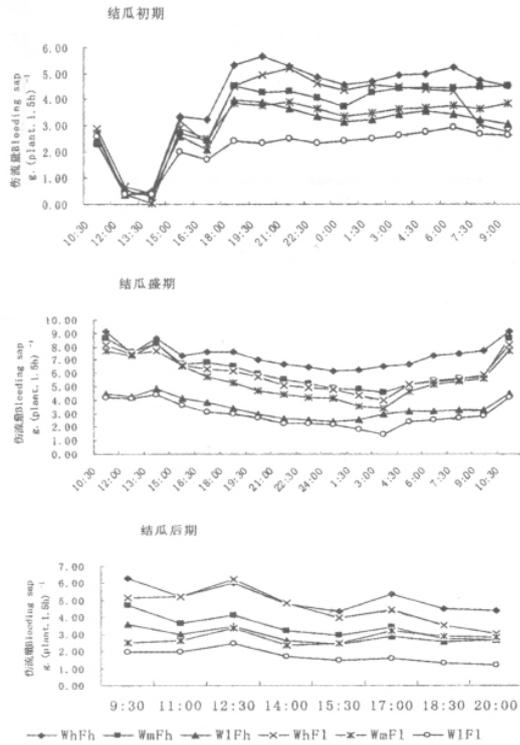


图1 不同水肥处理黄瓜不同生育阶段根系伤流强度日变化

2.3 测定黄瓜根系伤流同期温室气温变化

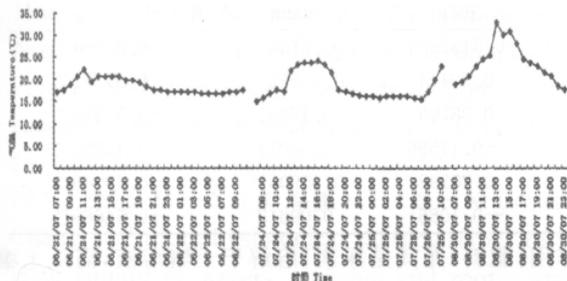


图2 黄瓜根系伤流测定同期(6月21日、7月24日、8月30日)温室室内气温变化

从图2可见,6月21日~6月22日,测定黄瓜根系伤流期间平均气温为 18.36℃,最高温度出现在上午 11:00(22.09℃);随后气温缓慢降低至 22日 07:00后开始升温;7月24日 07:00~25日 10:00,期间气温平均为 18.31℃,16:00前,气温缓慢上升,而后气温下

降至 25日 07:00后气温开始回升;8月30日,在 07:00~13:00 温室气温增加,13:00~23:00 温室气温下降,但此间平均温度 23.59℃。

2.4 不同水肥处理土壤 5cm、10cm、20cm 和 30cm 剖面土壤平均温度日变化

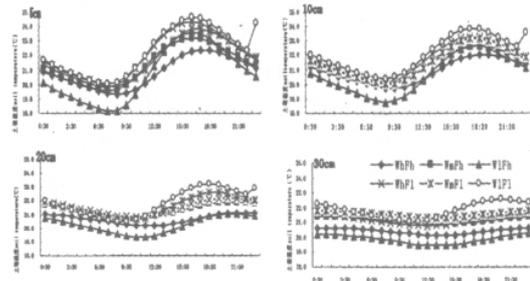


图3 不同水肥处理土壤 5cm、10cm、20cm 和 30cm 剖面土壤平均温度日变化

5cm、10cm、20cm、30cm 土温日变化(图3)整体上表现为“S”型变化,不同深度土壤温度从 0:00~6:00 呈现降低趋势,在 6:00~8:00 最低,9:00~22:00 土壤层处于升温过程,但各深度升温不同步。随土层深度增加,土壤温度缓慢向底层传递的过程中对太阳辐射的滞后性逐渐变大,深度每增加 5cm,最高温度出现时间依次滞后 1 小时左右,不同水分处理日平均温度随深度增加递减。

F1 各处理平均温度随深度增加逐渐降低,Fh 处理在 10cm 深处平均土温最高分别为(21.209℃,21.394℃,21.668℃),而后随深度增加降低;当水分条件一致时,同一土层深度土壤温度 F1 > Fh,可能是由于施用的尿素在土壤溶液中溶解,吸收热量使土壤温度降低,另一方面,Fh 处理植株生长旺盛拦截到达地面的太阳辐射能多于 F1 处理,致使土温下降;F1 各处理 5cm、10cm 深度土温表现为:Wl > Wh > Wm,20cm、30cm 深度土温表现为:Wl > Wm > Wh;Fh 各处理在测定各层均表现为:Wl > Wm > Wh。但随深度增加土壤温度波动幅度越来越小,其中波动最大的 WlF1 和 WhF1 在 5cm 深度绝对温度差值分别为 4.602℃和 4.545℃,波动幅度达到平均值的 20.66%和 20.70%。变化最小的是 WhFh 处理,温度变化绝对值 2.227℃,波动幅度 10.54%,该处理在 30cm 深度土温变化绝对值仅 0.398℃,波动幅度 1.90%。土壤温度呈现出上层变异性大于下层的规律,因上层土壤与大气接触,热交换频繁,而土壤是热的不良导体,热传导比较慢。

2.5 根系伤流影响因素分析

2.5.1 采用通径分析根系特征和土壤水分对根系伤

流量的影响。采用通径分析根数量(x1)、一级侧根总长度(x2)、根干重(x3)、地上部干重(x4)、以及土壤含水量(x5)对三个时期黄瓜 9:30~20:00 根系伤流量(Y)的影响,以 Y 拟合值为横坐标的标准残差散点图(见图 4),通过残差图可见,各点都在-2 到+2 范围内,表明采用线形回归分析方法是正确的,能体现数据规律和内在联系。自变量不做转换,因变量作取对数转换处理,得到 $R^2=0.5531, F=2.97, P=0.0568$ 。

通过通径系数分析表 2 显示,根数量、根干重对伤流量的直接作用以及通过根数量的其它因子的作用都为负,一级侧根总长度、地上部干重和土壤含水量对根伤流量的直接作用为正,对根系伤流量直接作用的影响顺序为:根干重(-1.06323)>地上部干重(0.87366)>

土壤含水量(0.59972)>一级侧根总长(0.47214)>根数量(-0.02941)。表明根干重对根系伤流量的影响最大,植株其它因素主要通过根干重的影响对根系伤流量产生较强影响,剩余通径系数=0.668532,表明影响伤流量还有其它因素。

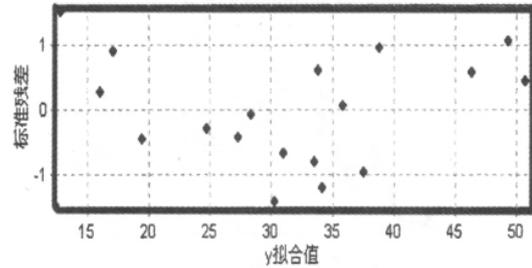


图 4 伤流量通径分析标准残差散点图

表 2 对根系伤流量影响因素通径分析

作用因子	直接作用	通过 x1	通过 x2	通过 x3	通过 x4	通过 x5
x1 根数量	-0.02941		0.15033	-0.39271	0.04186	0.15868
x2 侧根总长	0.47214	-0.00937		-0.86667	0.57846	0.01055
x3 根干重	-1.06323	-0.01086	0.38486		0.74833	-0.03426
x4 地上部干重	0.87366	-0.00141	0.31261	-0.9107		-0.08353
x5 土壤含水量	0.59972	-0.00778	0.00831	0.06074	-0.12169	

剩余通径系数=0.668532。

2.5.2 不同水肥处理黄瓜根系伤流强度日变化与空气温度和不同深度土壤温度的相关性分析。因为在温室封闭环境,空气湿度恒定(接近饱和),因此不考虑空气湿度对黄瓜根系伤流的影响。将黄瓜伤流强度日变化与空气温度、土壤温度变化进行相关分析,由表 3 可见,黄瓜根系伤流强度变化与空气温度变化均极显著

相关,与土壤温度在 5cm 处仅 WhF1 处理伤流强度变化与地温极显著负相关,其它相关性不显著,在 10cm、20cm 处仅 WhFh 处理伤流强度变化与地温显著正相关,其它相关性不显著,30cm 处 WhFh、WhFh 和 WmF1 处理伤流强度变化与地温极显著正相关。由此可见,表层土壤温度对植株伤流强度的影响不大,30cm 处土壤温度对伤流强度的影响最强烈。

表 3 不同水肥处理黄瓜根系伤流强度日变化与空气温度和不同深度土壤温度的相关性分析

		土壤温度(°C)				空气温度(°C)
		5cm	10cm	20cm	30cm	
根系伤流量日变化	WhFh	0.23741	0.31872*	0.51573**	0.55702**	-0.55501**
	WmFh	-0.15986	-0.07082	0.20414	0.40012**	-0.54281**
	WIFh	-0.06646	-0.05308	0.08706	0.16231	-0.57678**
	WhF1	-0.42419**	-0.29239	-0.11596	0.02014	-0.45627**
	WmF1	0.05750	0.09387	0.20298	0.45905**	-0.49649**
	WIF1	-0.25680	-0.18288	-0.10861	0.09812	-0.54669**

3 结论

土温随气温变化而变化但有后滞现象;随土层深度增加,土温度缓慢向底层传递的过程中对太阳辐射的滞后性逐渐变大,日平均土温随深度增加递减。不同水肥处理对土温有较大影响,平均土温和土温变化幅度在不同水肥处理间表现为:WIF1> WmF1> WhF1> WIFh> WmFh> WhFh。因为,土壤热容量小,而水热容量大,土壤水对土温既有降温作用又有保温

作用;肥料(尤其是尿素)溶解于土壤溶液,需从土壤环境中吸收热量,在一定程度上降低土壤温度。

伤流是植物根系主动吸水的过程,是根系生命活动的表现,伤流量多少,受土壤水分含量、温度等外部环境影响,还与根系发达程度和生命活动强弱有关。不同水肥处理黄瓜根系伤流强度和伤流量在结瓜初期、盛期和后期表现为:低—高一低变化,在早期,黄瓜植株弱小,根系不发达(平均根干重为 0.954 克/株,一

级侧根长度 432.7 厘米/株,分别为盛期的 57.60%和 50.32%),根系主动吸水能力弱,所以植株伤流强度和伤流量小;而后期,根系发达(平均根干重 6.778 克/株,一级侧根长度 1043.38 厘米/株),但木质化严重,根系吸收和传送物质的能力下降,根系主动吸水能力下降。不同水肥处理通过灌溉、施肥调节土壤水分含量和土壤溶液浓度,从而直接影响黄瓜根系的主动吸水。在根系伤流上表现为,当肥料水平相同时:Wh>Wm>Wl;当水分水平相同时:Fh>Fl;由此可见,在一定程度上,肥料可以补充植物对水分的需求,适量增施肥,可实现“以肥补水”。

参考文献

- [1] Markus L, Alberto S, Peter S, et al. Root development of maize *Zea mays* L. as observed with Mini-rhizotrons in Ly-simeters. *Crop Sci.*, 2000, 40: 1665-1672.
- [2] Pan R-C (潘瑞炽). *Plant physiology*. Beijing: higher education press, 2001(in Chinese).
- [3] Ma Q-L, Yamaguchi Takeshi, Nakata Noboru, et al. Evaluation of root activity by bleeding sap from the basal stem in soybean plants under excessive soil water. *Root Research*, 2005, 14(1): 3-8.
- [4] Sun Q-Q (孙庆泉), Hu C-H (胡昌浩), Dong S-T (董树亭), et al. Evolution of Root Characters during All Growth Stage of Maize Cultivars in Different Eras in China. *Acta Agronomica Sinica(作物学报)*, 2003, 29(5): 641-645(in Chinese).
- [5] Zhao Q-Z (赵全志), GAO E-M (高尔明), Huang P-S (黄丕生), et al. The Comparison and Nitrogen Nutrition Regulations of Bleeding in Neck-Panicle Node and Basal Internode of Rice. *Acta Agronomica Sinica(作物学报)*, 2001, 27(1): 103-109 (in Chinese).
- [6] Song H-X (宋海星), Li S-X (李生秀). Changes of root physiological characteristics resulting from supply of water, nitrogen and root-growing space in soil. *Plant nutrition and fertilizer science(植物营养与肥料学报)*, 2004, 10(1): 6-11(in Chinese).
- [7] Peuke A D. The chemical composition of xylem sap in *vitis vinifera* L. cv. Riesling during vegetative growth on the different Frankonian vineyard soils and as influenced by nitrogen fertilizer. *American Journal of Ecology*, 2000, 51(4): 329-339.
- [8] Zou Z-R (邹志荣), Li Q-M (李清明), He Z-Q (贺忠群). Effects of different irrigation maximums on growth dynamics, yield and quality of cucumber during fruit-bearing stage in green-house. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 2005, 21(Supp): 77-81 (in Chinese).
- [9] Xiong Q-E (熊庆娥). *Plant physiology experiment*. Chengdu: Sci-tech. Press in sichuan, 2003 (in Chinese).
- [10] Liu Y (刘莹), Gai J-Y (盖钧镒), Lü H-N (吕慧能). Identification of Rhizosphere Abiotic Stress Tolerance and Related Root Traits in Soybean *Glycine max* (L.) Merr.. *Acta Agronomica Sinica(作物学报)*, 2005, 31(9): 1132-1137(in Chinese).
- [11] Yang X-H (杨秀红), Wu Z-P (吴宗璞), Zhang G-D (张国栋). Correlations between Characteristics of Roots and Those of Aerial Parts of Soybean Varieties. *Acta Agronomica Sinica(作物学报)*, 2002, 28(1): 72-75(in Chinese).
- [12] Zhang H-B (张含彬), Ren W-J (任万军), Yang W-Y (杨文钰), et al. Effects of Different Nitrogen Levels on Morphological and Physiological Characteristics of Relay-Planting Soybean Root. *Acta Agronomica Sinica(作物学报)*, 2007, 33(1): 107-112(in Chinese).
- [13] Wang Q-J (王全九), Wang W-Y (王文焰), Li Y (李毅). Experimental Studies on the Coupled Movement of Soil Water, Salt, and Heat Transfer under Plastic Mulch. PhD thesis. Xi'an: Sci-tech. Press in Shaanxi, 2002 (in Chinese).
- [14] Chen L-J (陈丽娟), Zhang X-M (张新民), Wang X-J (王小军), et al. Effect of different soil moisture treatments on soil temperature of plastic film mulched spring wheat. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 2008, 24(8): 9-13(in Chinese).
- [15] Lü X-J (吕雄杰), Lu W-L (陆文龙), Song Z-W (宋治文), et al. Study on Spatial Variability of Soil Temperature and Water in Field. *Journal of irrigation and drainage(灌溉排水学报)*, 2006, 25(6): 97-99(in Chinese).

编校 陈莎莎