

# 无压灌溉日光温室番茄作物—皿系数研究

赵伟霞<sup>1</sup>, 蔡焕杰<sup>1</sup>, 单志杰<sup>2</sup>, 陈新明<sup>1</sup>, 王健<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:** 以  $-25$  kPa 作为土壤水势临界值, 将作物—皿系数 ( $K_p$ ) 设为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 六个处理, 研究了不同灌溉水量时的番茄产量、品质和灌溉水利用效率。通过经济效益评价, 研究了杨凌地区无压灌溉温室番茄获得最高经济效益时的作物—皿系数。通过张力计读数变化规律, 研究了利用张力计测量无压灌溉湿润体内土壤水势的特点。研究表明,  $K_p$  为 0.2~0.8 时, 灌溉水量的增加对番茄产量影响不大;  $K_p$  为 1.0~1.2 时, 灌溉水量的增加能显著提高番茄产量和果实大小;  $K_p$  为 0.2 时的灌溉水量能极显著提高番茄的灌溉水利用效率。在综合考虑了杨凌地区水价、番茄使用目的和市场价格波动规律后,  $K_p$  取值 1.2 能获得最高的经济效益。作物—皿系数法计算灌溉水量时的滞后性特点和张力计埋设位置, 是判断利用张力计监测土壤水势临界值方法有效性的两个重要因素。

**关键词:** 无压灌溉; 作物—皿系数; 产量; 品质; 灌溉水利用效率

**中图分类号:** S152.7\*5; S641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)04-0016-06

无压灌溉是一种新的局部控水灌溉技术, 因灌溉系统首部压力为小的正压、零压或负压, 所以毛管中水流速度近似为零, 灌水器出水完全依靠土壤吸力, 整个湿润体内没有饱和区的存在<sup>[1]</sup>。这样的含水率分布规律使作物根区通气状况良好, 协调了水—肥—气—热与植物的关系。试验研究<sup>[2,3]</sup>表明, 与沟灌相比, 无压灌溉并不降低作物产量, 但能显著地提高作物的水分利用效率。

作物高产主要依赖于适时、适量的灌溉。灌溉水量的计算方法中, 因作物耗水量与蒸发皿蒸发量有显著关系<sup>[4]</sup>, 所以利用蒸发皿蒸发量计算灌溉水量的方法因其简单和易操作性得到了广泛的应用<sup>[5]</sup>。其中的作物—皿系数 ( $K_p$ ) 是主要因素, 如果  $K_p$  已知, 则作物生长过程中的蒸发蒸腾量就会被推算出来。另外, 因为  $\Phi 20$  cm 蒸发皿经济适用, 因此比较适合在中国推广应用, 其可行性已经得到了 Yuan 等<sup>[6]</sup>的验证。

适时灌溉的方法包括固定灌水时间间隔<sup>[7,8]</sup>、固定水分亏缺<sup>[3,9]</sup>和固定蒸发量<sup>[10]</sup>。其中, 固定水分亏缺是最常用的方法。固定水分亏缺就是利用土壤水势或土壤体积含水量确定灌水时间, 其关键是土壤水势临界值和土壤水分下限值的确定。临界值和下限值反映了灌溉前土壤的干燥程度。一般来

说, 临界值选取的标准就是确保作物不经历水分亏缺或减产, Thompson<sup>[11]</sup>研究指出番茄的基质势临界值是  $-38 \sim -58$  kPa, 即基质势临界值不是一个固定点, 而是随蒸发需求量而改变, 蒸发需求量越低, 基质势临界值越小。康跃虎<sup>[12]</sup>研究认为, 滴头下方 20 cm 深度处的土壤水势控制在  $-25$  kPa 左右, 番茄就能获得很好的产量。张力计因为具有廉价和不需要校正等特点, 被广泛用来作为土壤水势测量的仪器。

本文以张力计测量的土壤水势 (临界值为  $-25$  kPa) 作为灌水时间确定标准, 以蒸发—皿系数法 ( $K_p = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ ) 计算的水量作为灌溉标准, 研究灌溉水量对无压灌溉温室番茄产量、品质和灌溉水利用效率的影响, 并通过经济效益分析, 研究杨凌地区无压灌溉温室番茄获得最高经济效益时的作物—皿系数。通过张力计读数变化规律, 研究利用张力计测量无压灌溉湿润体内土壤水势的特点。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验概况

试验于 2007 年 3~8 月在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室的日光温室内进行

收稿日期: 2008-05-12

基金项目: 国家自然科学基金 (50779059); 国家 863 计划 (2006AA100202)

作者简介: 赵伟霞 (1980—), 女, 河南长葛人, 在读博士, 主要从事节水灌溉新技术研究。E-mail: zhaoweixia111@yahoo.com.cn。

通讯作者: 蔡焕杰 (1962—), 男, 河北藁城人, 教授, 主要从事农业节水和水资源高效利用方面的研究。E-mail: caihj@nwsuaf.com。

行。番茄品种为金鹏一号,属中早熟品种。定植时间为 2007 年 4 月 13 日,结束时间为 2007 年 7 月 27 日。株距 30 cm,行距 80 cm。

1.2 试验设计与布置

试验采用一条灌水毛管控制一行作物的方式进行灌水。毛管为 Φ16 mm 的 PE 管,埋设深度 10 cm<sup>[13]</sup>,供水压力 0 cm。用直径 6 mm 的打孔器在毛管上打孔作为灌水器,间距 30 cm,孔口用 2 mm 厚的无纺布包裹以防堵塞,毛管长度与小区垄长相同。灌水前,毛管中先排气并充满水。

试验中,灌溉下限由张力计测量的土水势控制,即当张力计读数小于或等于 -25 kPa 时开始灌水。张力计埋设在地面以下 20 cm 深度处,距离灌水器 10 cm。灌溉水量根据放置在番茄冠层 20 cm 处的 Φ20 cm 标准蒸发皿蒸发量计算<sup>[12]</sup>,计算方程为:

$$W = K_{cp} \times A \times E_{pan} \quad (1)$$

式中:W 为灌溉水量(L); $K_{cp}$  为作物-Ⅲ系数;A 为小区面积(m<sup>2</sup>); $E_{pan}$  为两次灌水时间间隔内的蒸发皿累积蒸发量(mm)。

灌溉水量共设 6 个处理,分别为  $K_{cp} = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ 。每个处理设 3 次重复,采用随机完全区组设计。每天早上 8:00 测量土壤水势和蒸发皿蒸发量,灌水在 10:00 左右开始。

1.3 试验观测内容

番茄产量以单株计产,为减小灌水器间因土壤差异而产生的灌水不均匀性,各处理单株产量取所有番茄植株的平均产量计算。种植过程中,对植株进行单干整枝法管理,但不进行疏果。

2 结果与分析

2.1 番茄产量与灌溉水利用效率

番茄产量的方差分析结果见表 1。分析可知,区组间产量差异不显著,但处理间差异显著。处理

间的差异显著性见表 2。由表 2 分析可知,随着  $K_{cp}$  值的增大,灌溉水量急剧增加,由 85.68 mm 增加到 337.75 mm。 $K_{cp}$  等于 0.2 ~ 0.8 时的平均单株产量之间差异均不显著,而与  $K_{cp}$  等于 1.0 和 1.2 时的产量存在显著性差异。在  $K_{cp}$  为 0.2 和 0.4 时与  $K_{cp}$  为 0.6 ~ 1.2 时灌溉水利用效率差异显著。说明无压灌溉技术下, $K_{cp} = 0.2 \sim 0.8$  时灌溉水量的增加对番茄产量影响较小,而  $K_{cp} = 1.0 \sim 1.2$  时的灌溉水量对提高番茄产量有明显作用。 $K_{cp} = 0.2 \sim 0.4$  时的灌溉水量能明显提高番茄的灌溉水利用效率,且与  $K_{cp}$  为 1.2 时相比,产量仅减少 24.88% ~ 29.13%,达到了高效节水的效果。

表 1 产量的方差分析

Table 1 Variance analysis of yield

变异来源 Variation sources	df	SS	MS	F
区组间 Blocks	2	27484.96	13742.48	0.385
处理间 Treatments	5	1169440.45	233888.10	6.559**
试验误差 Experimental error	10	356591.76	35659.18	
总变异 Total variation	17	1553517.17		

2.2 番茄商品品质

由表 3 分析可知,与总产量相比,番茄前期产量(第一次采摘开始 15 天内的产量)与灌溉水量之间存在显著的线性关系( $y = 2.3305x + 164.49, R^2 = 0.87$ ),即灌溉水量越大,前期产量越高。说明灌溉水量的增加有利于番茄早熟,缩短番茄上架时间,增加经济效益。不同处理时,番茄数均在 12 个左右,说明灌溉水量对其影响不大,而主要由遗传因素决定。如果按照单果重对番茄进行分级,则  $K_{cp} = 0.2 \sim 0.8$  时的番茄为中果(100 ~ 149 g), $K_{cp} = 1.0 \sim 1.2$  时的番茄为大果(150 ~ 199 g)。

表 2 灌溉水量和产量

Table 2 Irrigation water amount and yield

项目 Items	$K_{cp}$					
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
灌溉水量(mm) Irrigation water amount	85.68	136.06	186.48	236.91	284.83	337.75
平均产量(g/株) Average yield(g/plant)	1644.07c	1742.57c	1658.28c	1696.98c	2085.43b	2319.72a
产量相对百分比(%) Relative percentage	70.87	75.12	71.49	73.15	89.9	100
灌溉水利用效率(kg/m <sup>3</sup> ) Irrigation water use efficiency	166.12a	104.90b	70.98c	56.47 c	56.20 c	53.33 c

表 3 番茄商品品质

Table 3 Commercial quality of tomato

商品品质 Commercial quality	$K_{cp}$					
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
前期产量(g/株) Initial production(g/plant)	463.72	435.73	545.84	654.68	799.06	1042.33
果数 Fruit number	11.76	11.65	12.32	11.77	12.58	12.04
单果重(g) Simple fruit weight	146.79	143.37	141.17	147.41	170.88	197.76

### 2.3 番茄经济效益

以上分析表明,在番茄整个生育期内,不同  $K_{cp}$  值将造成许多方面的差异,例如,灌溉水量、灌溉水利用效率、前期产量、总产量和商品品质。为找出适合杨凌地区无压灌溉温室番茄的最优  $K_{cp}$  值,本文拟从产量、灌溉水利用效率和品质方面进行评价,即通过综合考虑水价、番茄使用目的和市场价格波动规律,达到获得最高经济效益的目的。

例如,本试验种植番茄为食用品种,而非加工型

品种,因此番茄的商品品质和出售时间对市场价格有较大影响。经调查可知,2007年番茄获得前期产量时菜农的出售价格为中果每斤1.3元,大果每斤1.2元。后期价格为中果每斤1.0元,大果每斤0.8元。水价为1.7元/ $m^3$ 。对不同处理番茄进行经济效益分析,结果如表4所示。由表4可知, $K_{cp}$  值为1.2时番茄获得最大经济效益,所以在水分不是限制性因素的杨凌地区,无压灌溉温室番茄最优  $K_{cp}$  值可选取为1.2。

表 4 经济效益分析

Table 4 Economic effectiveness analysis

经济效益 Economic effectiveness	$K_{cp}$					
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
前期收入(元/株) Initial income(Yuan/plant)	1.206	1.046	1.419	1.702	1.918	2.502
后期收入(元/株) Later income(Yuan/plant)	2.361	2.091	2.225	2.085	2.058	2.044
水费(元/株) Water rate(Yuan/plant)	0.0218	0.0347	0.0476	0.0604	0.0726	0.0861
净收入(元/株) Net income(Yuan/plant)	3.544	3.102	3.596	3.726	3.903	4.459

### 2.4 土壤水势变化

为监测无压灌溉技术下湿润体内水分运移和消耗规律,分别在距离灌水器10cm的不同深度土层上(15、20、30、45、60cm)埋设张力计。

2.4.1 20cm 土层水势变化 利用土壤水势下限值控制灌水时间的首要条件是灌水前后张力计读数要

发生变化,即灌水后水分运移要到达陶瓷头周围。由无压灌溉的机理性研究<sup>[1]</sup>可知,湿润体大小与灌溉水量之间有密切关系。也就是说,若灌溉水量过小,则张力计位置就超出了湿润体范围,张力计的监测就变得没有意义。

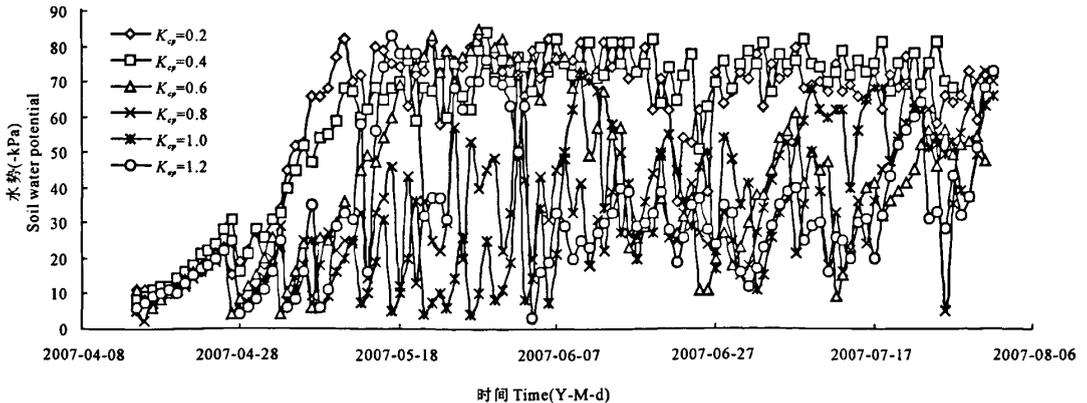


图 1 20cm 土层水势变化

Fig.1 Soil water potential change in 20 cm

由图1可知,所有处理的张力计读数均在灌水后出现了增大现象,说明张力计监测土壤水分的有效性得到了验证。在整个生育期内, $K_{cp}$ 为0.2和0.4处理的土壤水势从开花坐果期开始就始终小于-25 kPa,其余处理的土壤水势也在部分时间内小于-25 kPa,说明灌溉水量不能时刻与番茄的实际蒸发蒸腾量保持一致。这是因为基于蒸发皿蒸发量的灌溉水量计算具有滞后性,即今天的灌溉是为了补充昨天番茄的蒸发蒸腾量,当今天的耗水量大于昨天番茄的耗水量时,土壤水势就会出现小于-25 kPa的现象,反之,土壤水势就会等于或大于-25 kPa。产生这种现象的原因是因为受气象条件和生育期的影响,作物干旱与土壤干旱在作物整个生育期内不能时刻保持一致<sup>[14]</sup>。当作物干旱大于土壤干旱时,以张力计监测土壤干旱来实施水分管理将不能满足作物的实际蒸发蒸腾量。为解决作物干旱大于土壤干旱的现象,建议在作物整个生育期内结合天气预报等适时调整 $K_{cp}$ 值,使灌溉水量能够时刻满足作物的需水量。

2.4.2 不同土层水势变化 以 $K_{cp}$ 为0.4、0.8和1.2为例,整个生育期内不同土层水势的变化分析如图2所示。由图2分析可知,在苗期,因番茄根系浅,各处理水分消耗主要集中在30 cm土层以内。在开花坐果期,因番茄根系的下扎和蒸发蒸腾量的增大,各处理水分消耗深度急剧增加。

在结果期, $K_{cp}$ 为0.4时,土层15~60 cm的水势变化趋势基本相同且大小相似,均维持在-75 kPa左右,但番茄减产幅度不大。这是因为高频率低水量的水分管理虽然降低了土壤作为储水容库的功能,但至少为作物部分根区提供了每日的需水量,使其维持较高的水势而减少了水分亏缺<sup>[10]</sup>。

$K_{cp}$ 为0.8时,灌溉水量主要用于增加30cm以上土层的含水量,且20cm土层水势变化最剧烈,说明水分消耗主要集中在20 cm土层。与此相比,15 cm和30 cm土层水势在整个6月份内始终高于-15 kPa,这样高的水势很容易造成土壤通气不良,从而降低产量。

$K_{cp}$ 为1.2时,灌溉水量主要用于增加45cm以上土层的含水量。与 $K_{cp}$ 为0.8时相比, $K_{cp}$ 为1.2时的灌溉水量虽然明显增加,但各土层水势却明显小于 $K_{cp}$ 为0.8的处理。说明灌水量越大,土壤湿度越大,作物用于蒸发蒸腾所消耗的水分越大。

### 3 讨论与结论

无压灌溉时, $K_{cp}$ 为0.2~0.8时灌溉水量的增加

对番茄产量影响较小,而 $K_{cp}$ 为1.0~1.2时的灌溉水量对提高番茄产量有显著影响。表明番茄产量对低灌溉水量不敏感,而对高灌溉水量敏感,同时也说明在干旱地区以较少的灌溉水量就能使番茄获得一定的产量。产生这种现象的原因可能是因为 $K_{cp}$ 为0.2~0.8时的灌溉水量较少,相应的湿润体较小,不能保证番茄根系全部处于湿润体内,而 $K_{cp}$ 为1.0~1.2时的灌溉水量则能保证根系和湿润体之间的完全匹配。另外, $K_{cp}$ 为0.2~0.8时的产量之间差异不显著,也说明满足番茄部分根系的需水要求就能使番茄获得一定的产量。灌水量对番茄根系生长发育的调控作用,番茄根系吸水机理和需水要求等还需进一步研究。

$K_{cp}$ 为0.2~0.4时的土壤水势虽然远小于-25 kPa,但产量并没有明显降低,说明番茄基质势临界值不是一个固定值,而是随蒸发需求量改变的变量。这与Denmead<sup>[15]</sup>、Thompson<sup>[11]</sup>的试验结果相同。

利用作物-皿系数法计算的灌溉水量具有滞后性特点,即不能保持土壤干旱和大气干旱的一致性,因此需要结合天气预报等适时调整 $K_{cp}$ 值,才能达到时刻满足作物适宜含水率的要求。

利用土壤水势控制灌水时间时,因为湿润体大小与灌溉水量、土壤初始含水量等因素有关,所以每次灌水后的湿润体大小不一定相等,而湿润体大小直接影响着张力计监测土壤水分的有效性。另外,张力计埋设位置处的土壤水势是否具有代表性也是利用土壤水势临界值控制灌水时间时需要解决的问题。

#### 参考文献:

- [1] 赵伟霞,蔡焕杰,陈新明,等.无压灌溉土壤湿润体含水率分布规律与模拟模型研究[J].农业工程学报,2007,23(3):7-11.
- [2] 陈新明,蔡焕杰,单志杰,等.根区局部控水无压地下灌溉技术对黄瓜和番茄产量及其品质影响的研究[J].土壤学报,2006,43(3):486-492.
- [3] 陈新明,蔡焕杰,王健,等.根区局部控水无压地下灌溉技术在温室大棚中的试验研究[J].农业工程学报,2005,21(7):30-33.
- [4] Hansen V E, Israelsen O W, Stringham G E. Irrigation Principles and Practices[M]. Fourth ed. New York: Wiley, 1980.
- [5] Elliades G. Irrigation of greenhouse-grown cucumbers[J]. J Horti Sci, 1988,63(2):235-239.
- [6] Bao-Zhong Yuan, Yaohu Kang, Soichi Nishiyama. Drip irrigation scheduling for tomatoes in unheated greenhouse[J]. Irrig Sci, 2001, 20:149-154.
- [7] Ahmet Ertek. Suat Sensory, Ibrahim Gedik, et al. Irrigation scheduling based on pan evaporation values for cucumber (*Cucumis sativus*

L.) grown under field conditions[J]. Agricultural Water Management, 2006, 81:159—172.

green bean (*P. vulgaris* L.) to subsurface drip irrigation and partial rootzone drying irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84:274—280.

[8] Cafer Gençođlan, Hasibe Altunbey, Serpil Gençođlan. Response of

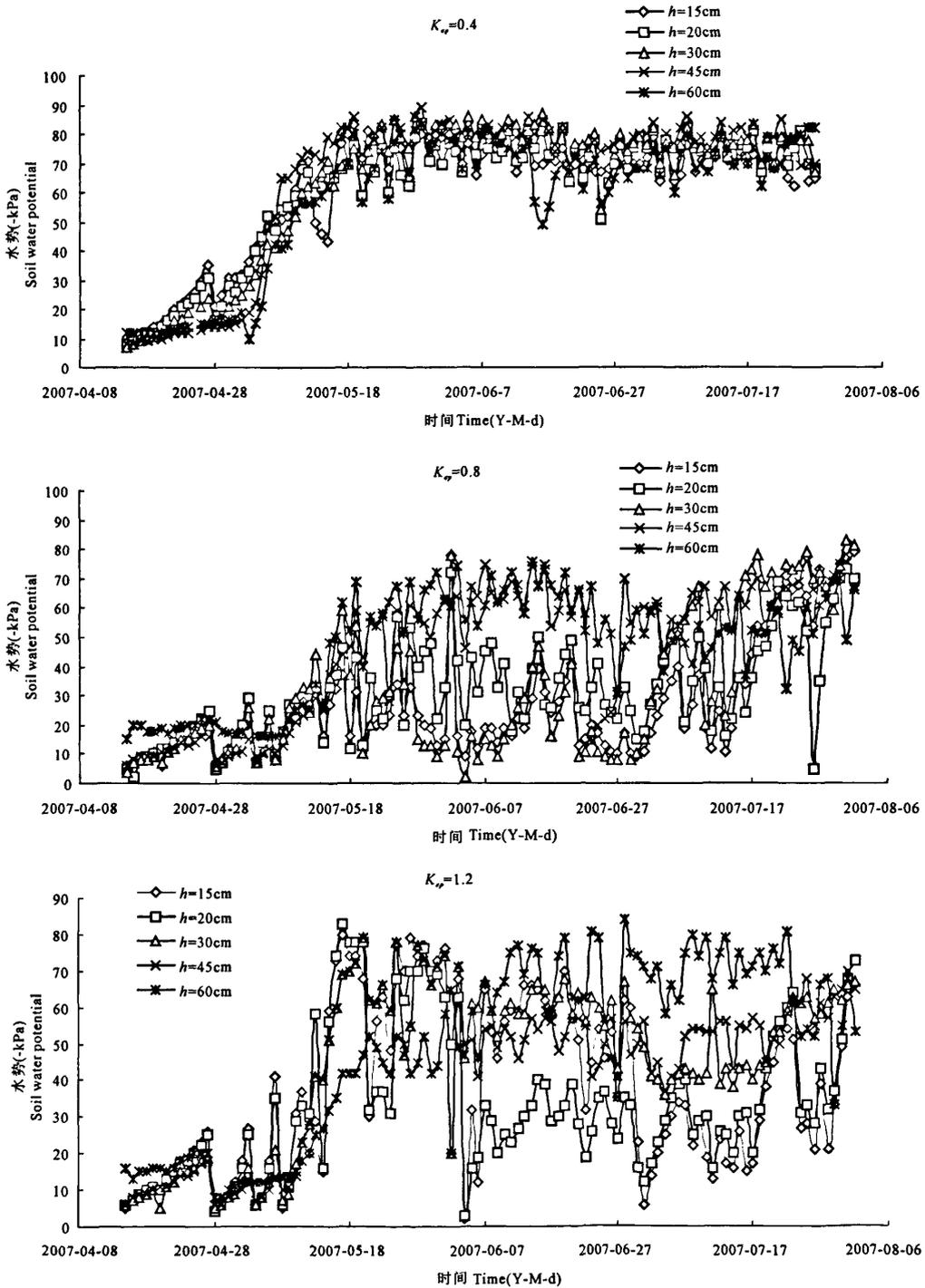


图 2 不同土层水势变化  
Fig.2 Soil water potential change in different soil layers

- [9] 王凤新,康跃虎.用负压计拟定滴灌马铃薯灌溉计划的方法研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(3):58—64.
- [10] Metin Sezen S, Attila Yazar, Salim Eker. Effect of drip irrigation regimes on yield and quality of field grown bell pepper[J]. Agricultural Water Management, 2006,81:115—131.
- [11] Thompson R B, Gallardo M, Valdez L C, et al. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors[J]. Agricultural Water Management, 2007,88:147—158.
- [12] 康跃虎.实用性滴灌灌溉计划制定方法[J].节水灌溉,2004,(3):11—15.
- [13] 单志杰,蔡焕杰,陈新明,等.无压灌溉埋管深度的机理性研究及大田试验[J].中国农村水利水电,2007,(3):44—47.
- [14] 赵艳霞,王霞棠,袁国旺.冬小麦干旱识别和预测模型研究[J].应用气象学报,2001,12(2):234—241.
- [15] Denmead C T, Shaw R H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions[J]. Austr Agron J,1962,45:385—390.

## Study on crop-pan coefficient of greenhouse tomato under non-pressure irrigation

ZHAO Wei-xia<sup>1</sup>, CAI Huan-jie<sup>1</sup>, SHAN Zhi-Jie<sup>2</sup>, CHEN Xin-ming<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil & Water Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Crop-pan coefficient is the ratio between crop water consumption and pan evaporation. Using  $-25$  kPa as the soil water potential threshold, and designing six treatments for crop-pan coefficient  $K_{cp} = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ , study was made on tomato yield, quality and irrigation water use efficiency under different irrigation water amount. The crop-pan coefficient which acquired highest economic effectiveness was studied through the economic effectiveness analysis, while the measurement character of soil water potential using tensiometers was studied through the tensiometer reading. The results indicated that when  $K_{cp}$  values was from 0.2 to 0.8, the irrigation water amount had no influence on tomato yield, but when  $K_{cp}$  values was from 1.0 to 1.2, the irrigation water amount had significant effect on tomato yield. When  $K_{cp}$  value was 0.2, the irrigation water use efficiency was improved significantly. After considering water price, tomato using aim and market price in Yangling district, there was the highest economic effectiveness when  $K_{cp}$  was 1.2. The hysteresis quality of irrigation water amount calculation using crop-pan coefficient and the buried position of tensiometer were main factors to estimate the validity of tensiometer measuring the soil water potential threshold.

**Key words:** non-pressure irrigation; crop-pan coefficient; yield; quality; irrigation water use efficiency