

# 控制性分根交替滴灌 对玉米蒸腾日变化和 WUE 的影响

刘德林, 刘贤赵

(烟台师范大学地理与资源管理学院, 山东 烟台 264025)

**摘要:**以盆栽玉米为试材,对控制性分根交替滴灌供水方式下,夏玉米蒸腾速率和水分利用效率(WUE)的日变化特征及其对产量水平上的 WUE 和地上生物量的影响进行了试验研究,以探索夏玉米在这种新型供水方式下的节水机理和节水效应。结果表明,晴好天气下, AI<sub>1</sub> 和 CK 蒸腾速率的日变化特征基本一致,均呈不对称的浅“M”型,且上午变化幅度大于下午, AI<sub>2</sub> 蒸腾速率的日变化呈以 12:00 时为轴的“M”型对称曲线。就 1 天的平均蒸腾速率而言, AI<sub>1</sub> 和 CK 相差不大,绝对差值仅为 0.01 mmol/(m<sup>2</sup>·s),表明 AI<sub>1</sub> 可在减少作物灌水量的同时而不降低作物的蒸腾速率, AI<sub>2</sub> 和 CK 相比,差异显著,仅为 CK 的 89.5%。产量水平上的 WUE, AI<sub>2</sub> 虽明显高于 CK,但其生物量下降明显(仅为 CK 的 52.5%), AI<sub>1</sub> 不但 WUE 明显高于 CK,且生物量差异不大,生物量仅下降 9%而耗水量减少 25%。初步表明控制性分根交替滴灌是一种高效可行的节水新技术。

**关键词:**控制性分根交替滴灌; WUE; 蒸腾速率; 日变化; 节水效应

**中图分类号:**S152.7 **文献标识码:**A

## Effect of Controlled Roots-Divided Alternative Drip Irrigation for Maize on Daily Variation of Transpiration Rate and Water Use Efficiency

LIU De-lin, LIU Xian-zhao

(College of Geography and Resource Management, Yantai Normal University, Yantai 264025, Shandong Province, China)

**Abstract:** Daily variation of transpiration rate and WUE of maize under controlled root-divided alternative drip irrigation were studied through potted experiment in order to investigate water saving mechanism and effect of the new irrigation method. The result indicated that daily variation of transpiration rate of maize showed same asymmetric shallow “M” type and the change range of a. m. was higher than that of p. m on the fine day in AI<sub>1</sub> and CK disposal, while it showed symmetrical “M” type, which took 12:00 as axial, in AI<sub>2</sub> disposal. As to the daily average transpiration rate, AI<sub>1</sub> was as much as that of CK and the absolute difference was only 0.01 mmol/(m<sup>2</sup>·s), which showed that AI<sub>1</sub> could reduce the quantity of irrigation while maintain the transpiration rate. Compared with CK, the transpiration of AI<sub>2</sub> was merely 89.5% of CK. Though the yield WUE of AI<sub>2</sub> was higher than CK, its biology yield reduced clearly, merely 52.5% of CK. Not only the yield WUE of AI<sub>1</sub> was higher than CK, but also its biology yield had little difference with CK. All of the data proved that controlled root-divided alternative drip irrigation was a practicable water saving technology.

**Key words:** controlled root-divided alternative drip irrigation; WUE; transpiration rate; daily variation; water-saving effect

## 0 引言

控制性交替灌溉(Controlled Alternative Irrigation,简称 CAI)是康绍忠等<sup>[1]</sup>依据作物光合作用、蒸腾失水与叶片气孔导度的关系以及根系对提高水分利用效率的功能而提出的一种全新的、不同于传统灌溉方式的农田节水调控思路。其主要理论依据是:①光合与蒸腾对气孔开度的反应不同;②局部干燥区域的根信号能帮助改变作物的气孔开度从而调节水分消耗。

始终控制一部分根系干燥,使作物的水分胁迫防卫系统在所有的时间都被触发,根源 ABA 作为水分胁迫的一种根信号连续地供给到作物的叶片,以减小气孔开度来最优调节气孔状况,使作物没有奢侈的气孔张开和蒸腾耗水损失发生<sup>[2]</sup>;③交替控制使部分根系经受一定程度的水分胁迫,能刺激根系的补偿功能,提高根系传导能力。利用植物普遍存在的补偿生长和根系生长的向水性来促进根系的生长,增强根的吸收功能,最终达到以不牺牲作物的光合产物积累提高作物水分利用效率。

收稿日期:2005-07-25

基金项目:山东省教委项目(J02L01);山东省自然科学基金项目(Q2002E03)。

作者简介:刘德林(1979-),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事水土资源高效利用方面的研究工作。

试验证明,CAI 比全面积均匀灌水节水效应明显<sup>[3,4]</sup>。然而,目前关于控制性分根交替滴灌供水方式对作物蒸腾日变化和 WUE 的研究尚不多见。为此,作者以盆栽玉米为试材,研究控制性分根交替滴灌这种新型供水方式下,作物蒸腾速率和单叶水平上 WUE 的日变化特征及其对产量水平上的 WUE 和地上生物量的影响,以探讨控制性分根交替滴灌供水方式下作物的节水机理和节水效应,寻求提高作物 WUE 和增产新途径,并为这种新型的供水方式以及丰富和发展控制性交替灌溉<sup>[1]</sup>提供更可靠的理论基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

试验于 2004 年 6 月 1 日~8 月 31 日进行。选取夏玉米(掖单 302)为试材,种植在直径 18 cm、高 21 cm 的塑料盆中。使用校园外容重为  $1.34 \text{ g/cm}^3$ 、田间持水量为 28.54% 的中壤质土(土壤有机质含量为 14.23 mg/kg,速效 P、碱解 N 和全 N 分别为 11.42 mg/kg、24.47 mg/kg 和 1.09 mg/kg)加 1/3 容积腐熟的厩肥过筛,装盆,每盆播催芽后的玉米种子 3 粒,待苗长至 3 叶时,每盆选留长势相似、大小一致的健壮苗 1 株,至 6 叶时开始进行交替控水处理,处理期间用 0.1 mm 的地膜严密覆盖土面,防止土层蒸发,各处理施肥和其他病虫害管理等完全相同。

### 1.2 试验设计

设对照(CK)和控制性分根 1/2 区域交替滴灌(Controlled Root-Divided Alternative Drip Irrigation,简称 CRDADI,记为 AI)两种灌溉处理方式,其中 AI 又设两种灌水处理(即对照灌水量为  $M$ ,AI<sub>1</sub> 灌水量为 75% $M$ ,AI<sub>2</sub> 灌水量均为 50% $M$ , $M$  值为从 65%田间持水量增加至 95%田间持水量时的耗水量),每处理 3 次重复。CK 盆内的土壤不分区,每次灌水时采用常规滴灌,AI 处理用塑料板纵向均匀隔成 A、B 两部分(塑料板上部正中央有一半径为 2.5 cm 的半圆形小孔,用以玉米分根),以阻止两侧水分交换(图 1),每次在不同 1/2 区域交替供水(即如果上次灌 A 区域,下次则灌 B 区域)。供水滴头采用注射器 7 号针头,由马氏瓶向滴头供水,通过调节马氏瓶的高度及其进气口、出水口的开度控制滴头流量。

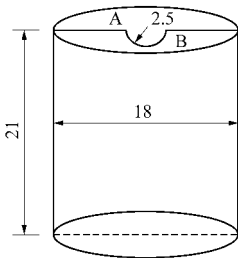


图 1 分根试验装置(单位:cm)

### 1.3 测定项目

每天用时域反射仪(TDR)检测土壤含水量,当 CK 土壤含水量低于 65%田间持水量时,用自制滴灌系统加水至 95%田间持水量,其他处理同时灌水,并记录每次灌水量,由水平平衡方程计算各时期的耗水量。用精度为 1 mm 的米尺测定根长

和株高,感量为 0.1 mg 的电子天平测定茎、叶及根干重(试验结束后,进行毁灭性采样,用水洗法将根从土壤中分离,将地上、地下部分放入烘箱(65℃)烘干至恒重),计算根冠比。用 Li-6400 型光合测定仪测定叶片的净光合速率和蒸腾速率。单叶瞬时 WUE 用净光合速率/蒸腾速率表示<sup>[5]</sup>,产量水平上的 WUE 用生物量/耗水量表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 CRDADI 供水方式下夏玉米蒸腾速率和光合速率的日变化特征

蒸腾强度是植物最重要的水分特征之一,它说明植物耗水的快慢,在一定程度上反映了植物调节水分的能力。

图 2 为不同天气条件、CRDADI 供水方式下 3 种不同处理蒸腾速率的日变化特征曲线。图 2(a)显示,在晴好天气条件下,AI<sub>1</sub> 和 CK 蒸腾速率的日变化趋势基本一致,均成不对称的浅“M”型,最高点和最低点均出现在同一时间,且上午变化幅度大于下午;AI<sub>2</sub> 蒸腾速率的日变化,呈以 12:00 时为轴的浅“M”型对称曲线。AI<sub>1</sub> 全天的蒸腾速率和 CK 之间差异不显著,绝对差值和相对差值范围分别在 0.03~0.29 mmol/(m<sup>2</sup>·s)和 2%~28%之间。相对于 AI<sub>2</sub> 而言,10:00 时以前,AI<sub>2</sub> 的变化趋势和 CK 较为一致且绝对差之相差不大,10:00 时以后,除 12:00 时和 14:00 时与 CK 相差不大,13:00 时明显高于 CK 外,其他时刻均明显低于 CK。就一日的平均蒸腾速率而言,AI<sub>1</sub> 和 CK 相差不大,绝对差值仅为 0.01 mmol/(m<sup>2</sup>·s),表明 AI<sub>1</sub> 可在减少作物灌水量的同时而不降低作物的蒸腾速率;AI<sub>2</sub> 和 CK 相差较大,绝对差值为 0.19 mmol/(m<sup>2</sup>·s),仅为 CK 的 89.5%。AI<sub>2</sub> 由于受水分胁迫比较严重,而降低了作物的蒸腾速率。这可能是 AI<sub>2</sub> 的部分根系受干旱胁迫导致根尖合成 ABA 增加使气孔导度减小所致。图 2(b)和图 2(c)表明,多云转晴和晴转多云天气条件下,不同处理的蒸腾速率也呈明显的日变化趋势,AI<sub>1</sub> 和 CK 的变化趋势极为一致且相差不大,多云转晴天气下的蒸腾速率日变化呈现多峰曲线,而在晴转多云时,则随太阳辐射的减小,蒸腾速率呈下降趋势,在傍晚 17:00 时左右达到一天中的最小值;全天中蒸腾速率的变化受天气的影响比较大,随天气状况的变化而出现较大的波动,这表明太阳辐射等气象因素是影响蒸腾速率的主要因子。

图 3(a)表明,晴好天气各处理光合速率的日变化呈双峰曲线,均从早上 8:00 时开始快速上升,CK 和 AI<sub>1</sub> 在 11:00 时左右达最高值,之后迅速下降,这与刘康山<sup>[6]</sup>等人的研究一致,之后,CK 和 AI<sub>1</sub> 的光合速率迅速下降,在 13:00 时出现光合“午休”现象,14:00 时左右达到第二次峰值。一天中,CK 和 AI<sub>1</sub> 变化趋势非常一致,且蒸腾速率值极为接近。AI<sub>2</sub> 峰值(最大和最小值)的出现时间均比 CK 和 AI<sub>1</sub> 提前 1 h,这可能是 AI<sub>2</sub> 的部分根系受水分胁迫比较严重,导致根尖合成 ABA 增加使气孔导度提前减小所致。总的来看,各处理叶片的光合速率,CK 最高,AI<sub>1</sub> 次之,AI<sub>2</sub> 最小;全天空平均蒸腾速率表现为 CK>AI<sub>1</sub>>AI<sub>2</sub>,分别为  $1.81 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , $1.80 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  和  $1.62 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,两者的日变化有明显不对称性,这种光合速率和蒸腾速率日变化的不对称性,形成了夏玉米叶片水平上的

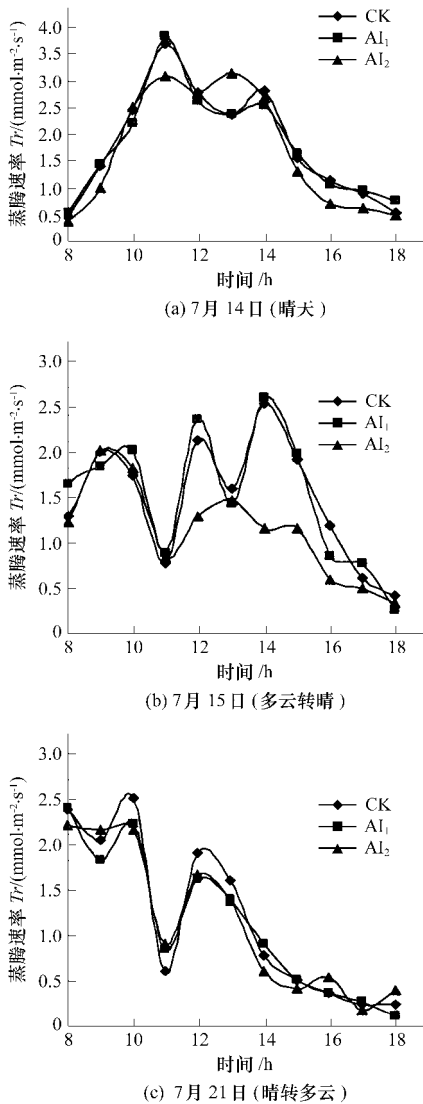


图2 CRDADI不同处理蒸腾速率的日变化

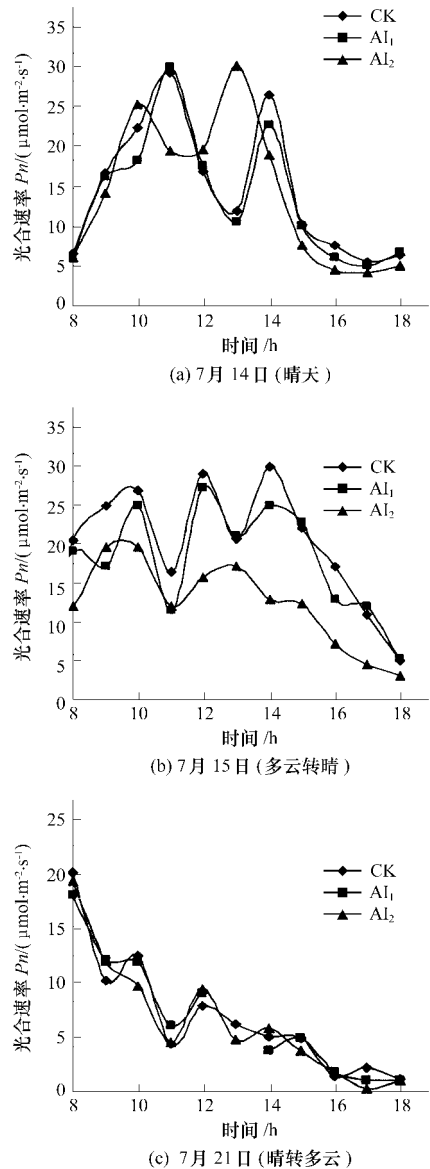


图3 CRDADI不同处理光合速率的日变化

表1 CRDADI对玉米单叶WUE的影响  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$

处理	7月14日 (晴天)	7月15日 (多云转晴)	7月21日 (晴转多云)	平均值
CK	8.76 <sup>b</sup>	14.42 <sup>a</sup>	6.11 <sup>a</sup>	9.76 <sup>a</sup>
$AI_1$	8.85 <sup>b</sup>	13.02 <sup>a</sup>	6.36 <sup>a</sup>	9.41 <sup>a</sup>
$AI_2$	9.20 <sup>a</sup>	10.85 <sup>b</sup>	5.34 <sup>b</sup>	8.46 <sup>b</sup>

WUE的日变化的特征(图4)。图3(b)和图3(c)显示的多云转晴和晴转多云天气条件下,不同处理光合速率的日变化和蒸腾速率日变化趋势较为一致,均受天气变化的影响较大,随太阳辐射的变化而呈现明显的日变化趋势。

## 2.2 夏玉米单叶WUE的日变化规律

WUE系指植物消耗单位水量所产生的同化物量,不仅是衡量作物耗水量与物质生产量之间关系的重要参数,也是反映节水农业中作物能量转化效率和评价作物生长适宜度的综合生理生态指标。植物在吸收 $\text{CO}_2$ 进行光合作用的同时,蒸腾释放一定量的水汽,单叶水平的水分利用效率采用光合速率和蒸腾速率之比来表示<sup>[5]</sup>。图4为夏玉米叶片水平上的WUE,在晴天天气下单叶WUE的日变化进程表现出明显的“浅W”型曲线,最大峰值均出现在温度较低的清晨和傍晚,这与方峰等人的研究较为一致<sup>[7]</sup>。而在温度较高的13:00时左右,WUE最低,这表明水分利用效率与温度呈现负相关关系;在晴转多云和多云转晴天气条件下,玉米单叶的WUE随天气的变化,呈极不规则变化趋势。由表1可以看出,就一日平均WUE而言, $AI_1$ 和CK相差不大,除7月14日(晴天)外,均高于 $AI_2$ 。

## 2.3 CRDADI对夏玉米地上产量水平上WUE、生物量和根系的影响

作物叶片水平上 $\text{CO}_2$ 和水汽交换参数的不同变化特征,最终反映在作物的生长指标及产量水平的WUE上。差异显著性检验(表2)表明, $AI_1$ 的株高、叶面积和地上生物量与CK相比差异较小,但与 $AI_2$ 相比存在明显差异。以地上生物量为例, $AI_1$ 的地上生物量与CK相比,差异不显著,绝对差值仅为1.37g,相对差值为12.94%, $AI_2$ 和CK相比,差异显著,仅为CK的52.5%。 $AI_2$ 产量水平上的WUE虽明显高于CK,但其生物量下降明显(仅为CK的52.5%),严重影响了玉米的正常

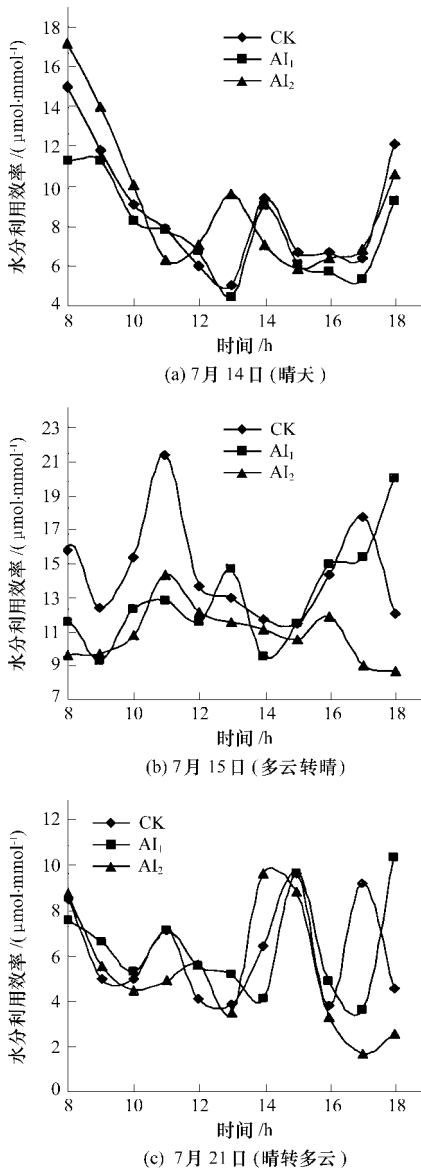


图4 CRDADI不同处理WUE的日变化

生长, AI<sub>1</sub>不但水分利用效率明显高于CK,且生物量差异显著,生物量仅下降9%而耗水量减少25%,节水效果明显。就根总数和根干重而言, AI<sub>1</sub>和CK绝对差值较小,差异不显著, AI<sub>2</sub>和CK差异显著,说明AI<sub>2</sub>受水分胁迫比较严重,已影响到作物根系的正常生长。

表2 CRDADI对玉米生长指标和产量水平WUE的影响

处 理	CK	AI <sub>1</sub>	AI <sub>2</sub>
株高/(cm·株 <sup>-1</sup> )	116.5 <sup>a</sup>	117.3 <sup>a</sup>	101.1
叶面积/(cm <sup>2</sup> ·株 <sup>-1</sup> )	2 169.15 <sup>a</sup>	2 663.41 <sup>a</sup>	1 588.63 <sup>b</sup>
地上年均量/(g·株 <sup>-1</sup> )	11.96 <sup>a</sup>	10.59 <sup>a</sup>	6.28 <sup>b</sup>
根总数/n	27.1 <sup>a</sup>	29.6 <sup>a</sup>	23.2 <sup>b</sup>
根干重/(g·株 <sup>-1</sup> )	3.77 <sup>a</sup>	3.75 <sup>a</sup>	3.18 <sup>b</sup>
WUE/(g·kg <sup>-1</sup> )	2.86 <sup>b</sup>	3.48 <sup>a</sup>	3.44 <sup>a</sup>

### 3 结 语

作物蒸腾强度是植物最重要的水分特征之一,它表明了植

物耗水的快慢,在一定程度上反映了植物调节水分的能力及适应不同环境的方式<sup>[8]</sup>。研究CRDADI这种新型供水方式下,作物生理日变化时段性特征及生理生态机理,对寻求提高作物WUE和增产新途径有一定的积极意义。

有关夏玉米蒸腾速率等日变化特征的研究多数集中在充分供水<sup>[9,10]</sup>和调亏灌溉<sup>[11]</sup>等方面。另一方面,有关夏玉米WUE在不同条件下变化特征的试验研究多集中在宏观产量水平上<sup>[12]</sup>。本文以盆栽玉米为试材,尝试性地探讨了CRDADI这种新型供水方式对夏玉米叶片蒸腾速率和WUE等日变化的影响。结果表明,不同处理蒸腾速率的日变化,均呈现明显的变化趋势,在晴好天气下, AI<sub>1</sub>和CK的日变化趋势基本一致,均成不对称的“M”型且绝对差值相差不大;夏玉米叶片水平上的WUE,晴好天气下日变化进程表现出明显的浅“W”型曲线,最大峰值均出现在温度较低的清晨和傍晚,表明夏玉米的WUE与太阳辐射呈负相关关系,对日平均单叶水平上的WUE而言, AI<sub>1</sub>和CK相差不大,除晴天外均高于AI<sub>2</sub>;对夏玉米产量水平上的WUE和地上生物量的显著性检验表明, AI<sub>1</sub>地上生物量与CK之间差异不显著,绝对差值仅为1.37g,相对差值为12.94%, AI<sub>2</sub>和CK相比,差异显著,仅为CK的52.5%; AI<sub>2</sub>产量水平上的WUE虽明显高于CK,但其生物量下降明显(仅为CK的52.5%),严重影响了玉米的正常生长, AI<sub>1</sub>不但水分利用效率明显高于CK,且生物量差异不大,生物量仅下降9%而耗水量减少25%,节水效果明显。

#### 参考文献:

- [1] 康绍忠,张建华. 控制性交替灌溉——一种新的农田节水思路[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1): 1—6.
- [2] 梁宗锁,康绍忠,高俊凤,等. 分根交替渗透胁迫与脱落酸对玉米根系生长和蒸腾效率的影响[J]. 作物学报, 2002, (3): 250—255.
- [3] KANG S Z, LIANG Z S. Water use efficiency of controlled alternate irrigation on root-divided maize plant[J]. Agricultural Water Management, 1998, 38: 68—76.
- [4] 梁宗锁,康绍忠. 控制性分根交替灌溉的节水效应[J]. 农业工程学报, 1997, 13(4): 59—63.
- [5] Fischer R A, Turner N C. Plant productivity and the arid and semi arid zones[J]. Ann. Rev. Plant Physiol, 1978, 29: 277—317.
- [6] 刘庚山,郭安红. 不同覆盖对夏玉米叶片光合和水分利用效率日变化的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 152—156.
- [7] 方 峰,黄占斌. 黄土丘陵区大垄沟优化措施对玉米生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 31—35.
- [8] 王沙生. 植物生理学[M]. 北京:中国林业出版社, 1999.
- [9] Tadashi Hirasawa, Hsiao T C. Some characteristics of reduced leaf photosynthesis at midday in maize growing in the field[J]. Field Crop Research, 1999, 62: 53—62.
- [10] 梁宗锁,李新有,康绍忠. 影响夏玉米单叶WUE的冠层因子分析[J]. 西北农业学报, 1996, 5(1): 13—16.
- [11] Shaozhong Kang, Wenjuan Shi. An improved water-use efficiency for maize grow under regulated deficit irrigation[J]. Field Crop Research, 2000, 67: 207—214.
- [12] Tolk J A, Howell T A, Evett S R. Effect of mulch, irrigation and soil type on water use and yield of maize[J]. Soil and Tillage Research, 1999, 50(2): 137—147.