

# 局部灌水方式对玉米不同根区土-根系统水分传导的影响

胡田田<sup>1</sup>, 康绍忠<sup>1,2\*</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

**摘要:** 以管栽玉米进行分根实验, 在均匀灌水、固定部分根区灌水和根系分区交替灌水 3 种方式下, 分期测定两个 1/2 根区及整个根区的土-根系统总水分传导(简称水导)、单位根面积和单位根长水导, 研究局部灌水方式对玉米不同根区土-根系统水分传导的影响。结果表明: 各阶段处理 5 d 和 10 d 时, 总水导、单位根面积和单位根长水导一致表现为固定灌水和交替灌水的灌水区较之均匀灌水 1/2 根区均显著增大, 说明局部灌水可以显著增强灌水区土-根系统水分传输的补偿效应。固定灌水时, 灌水区水导始终显著大于非灌水区; 交替灌水时, 两个根区呈交替变化趋势。与固定灌水相比, 交替灌水非灌水区的土壤水分传导明显增大。因此, 交替灌水能更好利用各部分根系资源以满足作物需水要求。

**关键词:** 局部灌水方式; 不同根区; 土-根系统水分传导; 补偿效应; 玉米

**中图分类号:** S274.1; Q945

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2007)2-0011-06

胡田田, 康绍忠. 局部灌水方式对玉米不同根区土-根系统水分传导的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 11-16.

Hu Tiantian, Kang Shaozhong. Effects of localized irrigation model on hydraulic conductivity in soil-root system for different root-zones of maize[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 11-16. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

近年来, 为了揭示植物水分吸收机理、明确抗旱植物的生物学基础, 人们对植物根系水分传导及其影响因素进行了大量研究<sup>[1-3]</sup>。但根系实际吸水的多少不仅与根系本身的水分传导能力有关, 还与土壤水分传导及土根界面水分传导有关, 即取决于整个土-根系统的水分传导(Hydraulic conductivity in soil-root system)。而且, 植物根系与其土壤环境之间存在着密切的相互作用, 并由此对植物水分吸收与利用产生影响<sup>[4,5]</sup>。因而, 要进一步提高作物水分利用效率, 需对整个土-根系统的水分传输过程进行深入研究。

研究和实践表明, 固定或交替隔沟灌溉、控制性分根交替灌溉等维持部分根区干燥的灌水方式, 在不影响光合强度的前提下可以明显减小作物的蒸腾速率, 减少灌水量, 维持甚至提高产量, 改善作物品质, 显著提高作物的水分利用效率<sup>[6-8]</sup>。局部灌水方式与传统供水方式

的显著区别在于, 整个根系不再处于均一环境, 而是处在非均一且多变的土壤环境中, 这必然对植物的水分吸收和运输产生很大影响。因此, 要充分挖掘局部灌水在提高农业用水效率中的作用, 急需对局部灌水条件下作物的水分吸收与传导进行深入探讨。

目前关于作物土-根系统水分传导的研究很少, 仅有的研究也是通过根系处在均一环境中进行的<sup>[9]</sup>。本文以管栽玉米进行分根实验, 在均匀灌水、固定部分根区灌水和根系分区交替灌水 3 种方式下, 分期测定两个 1/2 根区及整个根区的土-根系统水分传导, 研究不同根区的土-根系统水分传输特征, 以期通过改变灌溉方式提高作物水分利用效率提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试作物为玉米(陕丹 9 号, 正交)。供试土壤为娄土, 前茬作物为冬小麦。其基本理化性状为, 有机质 15.55 g/kg, 全氮 0.89 g/kg, 碱解氮 50.5 mg/kg, 速效磷 14.73 mg/kg, 速效钾 140.47 mg/kg。

实验采用直径 5.2 cm, 高 30 cm 的 PVC 管自制分根装置, 两侧各打 5 个  $\Phi 4.2$  mm 的小孔, 以便维持土壤的通透性, 对玉米进行分根实验。每管装风干土 640 g, 装土容重 1.17 g/cm<sup>3</sup>, 装土前底施纯氮 0.2 g/kg 土(氮肥用尿素), 五氧化二磷 0.13 g/kg 土(磷肥用磷酸二氢钾)。装土时两侧各插入一根黑色塑料毛管( $\Phi 6.7$  mm)用于灌水。管上打 2 行  $\Phi 2$  mm 的小孔用于渗水, 每行 10 个。该管用两层窗纱包裹, 以防土壤堵塞渗水孔。玉

收稿日期: 2006-02-13 修订日期: 2006-10-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50339030); “十五”国家节水农业重大专项(2002AA2Z4041); 陕西省自然科学基金(2006C106); 西北农林科技大学科研专项基金资助

作者简介: 胡田田(1966-), 女, 陕西礼泉人, 博士, 副教授, 主要从事植物对水分养分局部供应的适应性及其机理研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。

Email: hutiantian@tom.com

\*通讯作者: 康绍忠, 博士, 教授, 主要从事农业节水与水资源问题的研究。北京 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 100083。

Email: kangshaozhong@tom.com

米种子在 25℃ 培养箱中催芽,待胚根露出后,精心挑选发芽情况基本统一的种子进行播种。种子竖起置于塑料布正上方,使种子腹背面与塑料布垂直。每天播种一个重复,分 4 d 播完,共播种玉米 150 管。玉米出苗后 22 d 进行灌水处理。

## 1.2 实验处理

实验处理为传统均匀灌水、根系分区交替灌水和固定部分根区灌水 3 种。实验处理共 40 d,每 10 d 为一个阶段。其中,根系分区交替灌水,每处理 10 d 交替 1 次,交替之前,维持土壤湿润区域不变。灌水区土壤含水率控制在田间持水量的 65%~95%,采用恒重法灌水。水分用注射器通过灌水管注入。各处理的灌水量见表 1。与均匀灌水相比,固定灌水、交替灌水的灌水量分别减小 7.44%~26.36%。

表 1 不同时期各处理的灌水量

灌水方式	处理天数/d								总灌水量
	5	10	15	20	25	30	35	40	
均匀灌水 C	121	220	334	467	511	638	1086	1217	4594
固定灌水 F	112	162	259	344	444	538	881	1064	3804
交替灌水 A	112	162	293	407	455	554	855	1099	3937

## 1.3 测定项目及方法

实验对均匀灌水、交替灌水和固定灌水 3 种灌水方式,在每个阶段处理 5 d 和 10 d 时,分全部根区和两个 1/2 根区,用美国造 3005 型压力室测定土-根系统水分传导(简称水导)。之后,将根系及时小心地冲洗出来,用于根长和根面积的测定。考虑到局部灌水时仅给 1/2 根区供水,加之由于实验方案规定了种植玉米的管子数量太多,处理 10 d 时仅测定了灌水的 1/2 根区的水分传导。实验重复 3~4 次,与播种相同,分 4 d 完成。

### 1) 土-根系统水分传导的测定

将玉米从茎基部以上约 10 cm 处剪断,连同分根管一起装入压力室中。用高压氮气缓慢加压,用放大镜观察刚有液汁渗出时的压力作为与根系水势相平衡的压力,然后逐渐加压 6 次,在每一压力下等切口处渗出液流速稳定时(约需 3~4 min),用装有药用无籽棉的小塑料瓶收集汁液 2~3 min,计算每一压力下单位时间的水流量,水流量与压力差回归直线的斜率即为土-根系统的总水分传导<sup>[9]</sup>。

测定 1/2 根区土-根系统水分传导时,将生长玉米的分根管小心拆开,从茎基部剪掉另一半根区的根系,留下将要测定的一半,用事先准备好的装有土壤的半个分根管固定好之后,同上操作进行测定。

为了尽可能消除温度等<sup>[9-11]</sup>非实验因素对处理间差异的影响,在前一天晚上将要测定的玉米管子放在室内,并于第二天上午 6~12 点在 28℃ 的室温条件下测定,且采用循环测定的区组设计思想,3~4 d 完成一个处理阶段的测定工作。

### 2) 根系长度与面积的测定

将根系样品小心、仔细、快速地摊开在一张塑料胶片上,用扫描仪进行扫描之后,用 CI-400 型根系图像分析系统获得根系的长度与面积,再折算为整个根区根系的长度与面积。

根据测定的土-根系统水分传导(即总水导)与根长和根面积,可以计算出单位根面积水导与单位根长水导。

## 1.4 统计分析

用 spss 统计分析软件对实验数据进行方差分析与多重比较。方差分析用 one-way ANOVA,多重比较用 Duncan 法( $\alpha = 0.05$ )进行。

## 1.5 符号说明

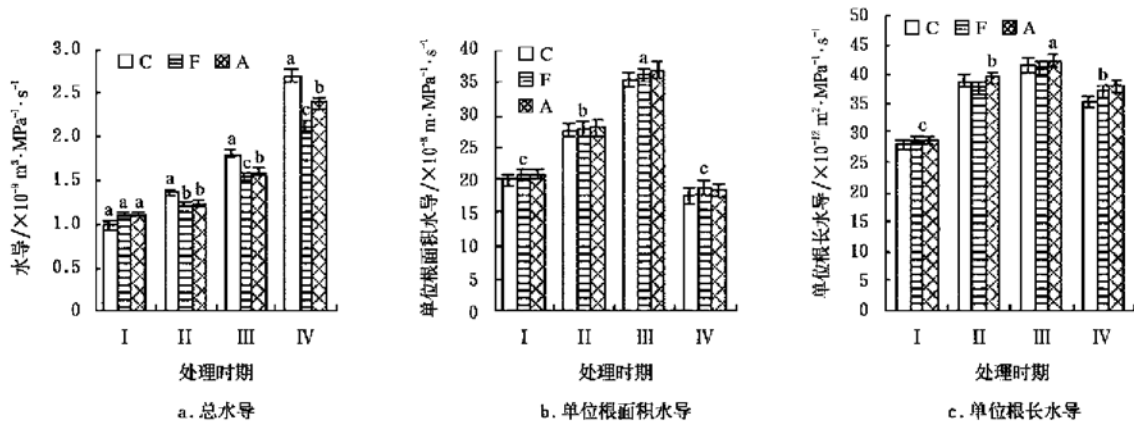
C—传统均匀灌水;F—固定部分根区灌水;A—根系分区交替灌水。Ch—均匀灌水的 1/2 根区;Fd—固定灌水的非灌水区;Fw—固定灌水的灌水区;Aw—交替灌水的灌水区。Aa—交替灌水的先灌水区;Ab—交替灌水的后灌水区。I、II、III、IV 分别指处理 0~10、10~20、20~30、30~40 d 4 个阶段。

## 2 结果与分析

### 2.1 全部根区的水导及其动态变化

各阶段处理 5 d 时全部根区的水导(图 1)表明,均匀灌水、固定灌水和交替灌水 3 种灌水方式均表现为:随时间延长,玉米根区的总水导不断增大,而单位根面积水导和单位根长水导在玉米出苗 47 d(处理 25 d)前后达到高峰,之后明显减小,其中尤以单位根面积水导的减小幅度更大。说明随着生长发育过程的进行,从拔节到抽雄期,玉米的水分需求不断增大,但根系的水分传输能力并不是不断增强,而是增大到一定生育时期后反而减小。

从图 1 可以看出,全部根区的总水导表现为:第 I 阶段处理 5 d 时局部灌水略大于均匀灌水,但差异不显著;第 II、III 阶段均匀灌水显著大于局部灌水,第 IV 阶段表现为均匀灌水 > 交替灌水 > 固定灌水。说明灌水方式从整个根区均匀供水变为局部根区供水后,作物土-根系统的水分传输速率降低,证明了局部供水可以减小作物蒸腾<sup>[6,7]</sup>。



注: 1. 图 a 中的 a, b, c 表示同一时期各处理间多重比较结果; 各处理不同处理时期期间的差异均达 95% 显著水平;  
2. 图 b 和图 c 中同一时期各处理间差异不显著, a, b, c 表示 4 个时期多重比较结果。

图 1 各阶段处理 5 d 时全部根区的水导

Fig. 1 Hydraulic conductivity of whole root-zone at the fifth day of every stage treatment

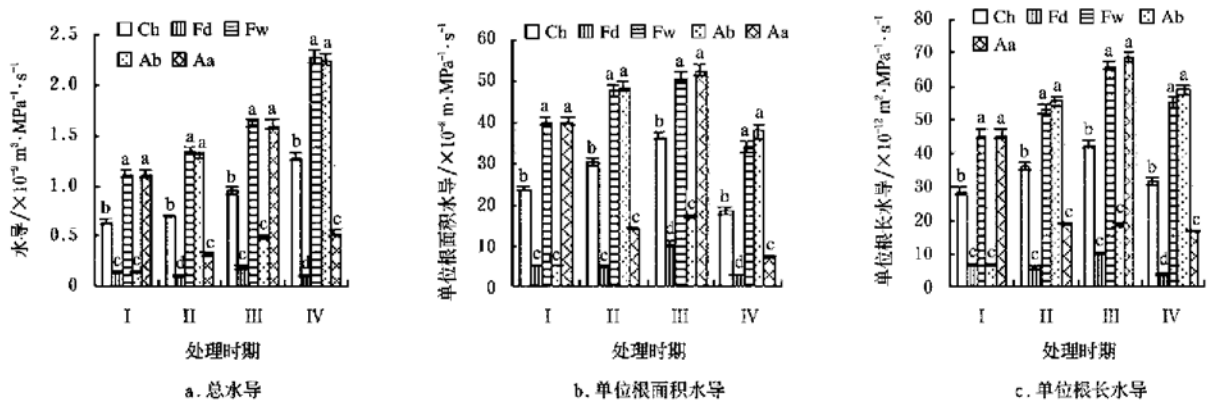
## 2.2 局部根区的水导及其动态变化

### 1) 各阶段处理 5d 时不同根区的水导

各阶段处理 5 d 时, 总水导、单位根面积水导和单位根长水导一致表现为: 固定灌水和交替灌水的非灌水区较之均匀灌水的 1/2 根区明显减小, 而灌水区较之均匀灌水显著增大(图 2), 其中, 总水导增加 68.70%~91.95%; 单位根面积水导增加 38.66%~106.92%; 单位根长水导增加 47.34%~85.08%。说明局部灌水条件下, 灌水区从土壤到根系的水分传输过程对根区非均匀供水有明显的补偿效应。

从图 2 还可以看出, 固定灌水条件下, 非灌水区的

水导始终非常低, 灌水区较之非灌水区显著增大。交替灌水条件下, 两个根区呈交替变化, 始终是灌水区显著大于非灌水区。两种局部灌水方式相比, 以总水导、单位根面积和单位根长水导 3 种指标表征的非灌水区水导均表现为, 交替灌水较之固定灌水显著增大, 其中, 总水导增加 139.78%~373.23%; 单位根面积水导增加 66.77%~189.7%, 单位根长水导增加 81.17%~362.57%。此外, 两个根区水导间的差距表现为交替灌水较之固定灌水明显减小。以上分析表明, 与固定部分根区持续供水相比, 根系分区交替供水可以相对均衡地利用作物不同区域根系的吸水与输水功能。



注: 图中 a, b, c, d 表示同一时期不同处理各 1/2 根区间多重比较结果

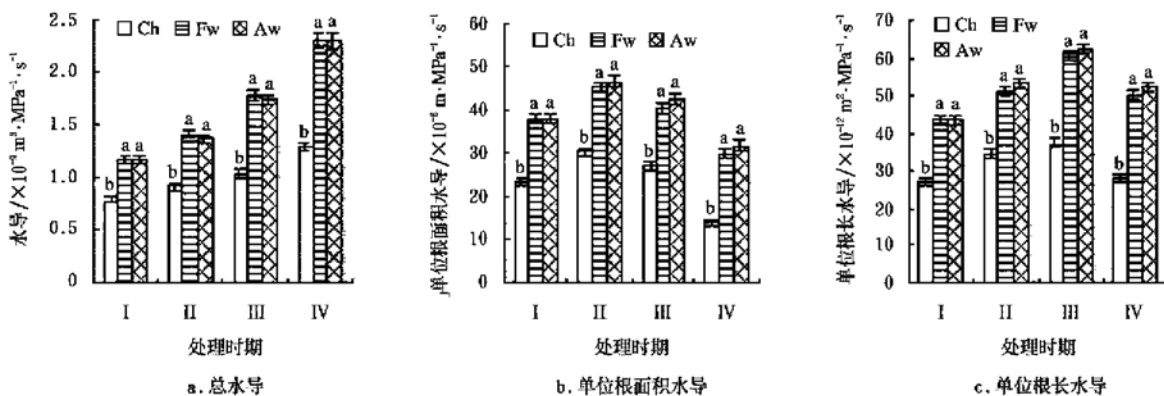
图 2 各阶段处理 5d 时 1/2 根区的水导

Fig. 2 Hydraulic conductivity of half root-zone at the fifth day of every stage treatment

### 2) 各阶段处理 10 d 时灌水区的的水导

从图 3 可以看出, 与处理 5 d 时相同, 各阶段处理 10 d 时, 两种局部灌水方式灌水区的总水导、单位根面

积和单位根长水导均较均匀灌水的 1/2 根区显著增大。说明局部灌水条件下, 灌水区土-根系统水分传输对根区局部供水始终保持显著的补偿效应。



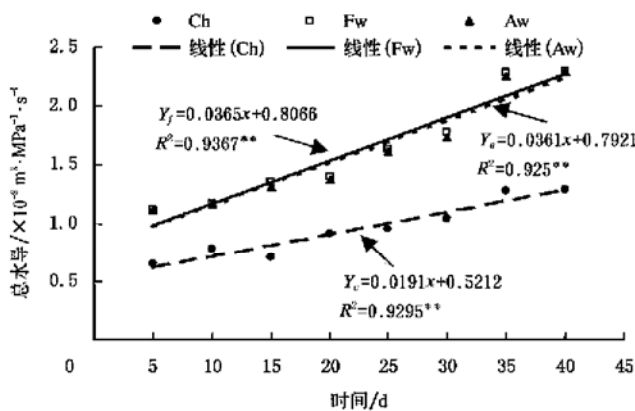
注: 图中 a, b 表示同一时期各处理间多重比较结果

图 3 各阶段处理 10 d 时灌水根区的水导

Fig. 3 Hydraulic conductivity of the irrigated root-zone at the tenth day of every stage treatment

3) 灌水区水导的动态变化

图 4 表明, 随时间延长, 均匀灌水 1/2 根区、局部灌水灌水区的总水导均呈不断增大趋势, 总水导随时间的变化可用线性方程进行拟合, 3 种灌水方式的拟合方程均达 99% 的显著水平。单位根面积水导和单位根长水导的变化规律与总水导有所不同, 其随时间变化呈二次抛物线型(图 5 和图 6)。随时间推移, 玉米的总吸水量不断增大, 但其单位根系的水分传输速率在增大到一定时间后呈减小趋势。原因可能在于: 一方面, 拔节以后, 玉米根系大量增殖, 快速延伸并增粗, 使根长与根面积迅速增大<sup>[12]</sup>, 而实验所控制的土壤含水率范围决定了土-根系统水分传导不可能持续不断增大, 从而导致单位根系的水分传输速率降低; 另一方面, 可能还与部分根系衰老、根表面栓化、膜透性降低<sup>[13]</sup>, 从而导致水流通道的阻力增大有关。



注: 统计分析的显著水准为,  $df = 6, R_{0.05} = 0.707, R_{0.01} = 0.834$ ; 下同

图 4 灌水根区总水导与处理时间的关系

Fig. 4 Relationships between total hydraulic conductivity and time for irrigated root-zone

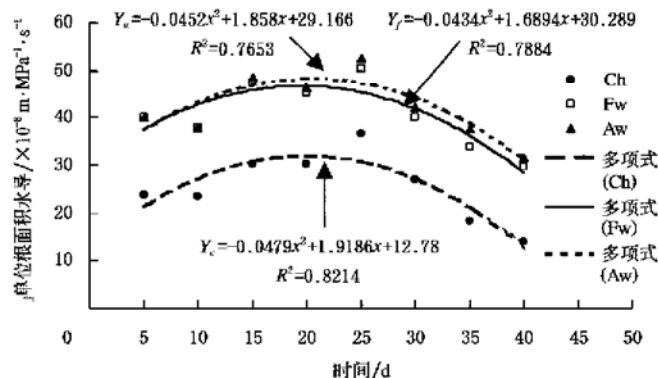


图 5 灌水根区单位根面积水导与处理时间的关系

Fig. 5 Relationships between hydraulic conductivity per root area and time for irrigated root-zone

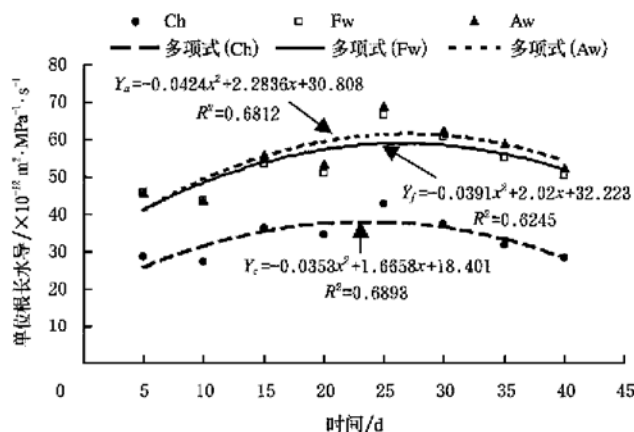


图 6 灌水根区单位根长水导与处理时间的关系

Fig. 6 Relationships between hydraulic conductivity per root length and time for irrigated root-zone

从图 4~ 图 6 还可以看出, 交替灌水和固定灌水均表现为, 以总水导、单位根面积和单位根长水导 3 种指标表征的灌水区土-根系统水分传导均较之均匀灌水的

1/2 根区显著增大, 进一步说明了局部灌水条件下, 灌水区从土壤到根系的水分传输过程对根区非均匀供水有明显的补偿效应, 为保证作物的水分需求奠定了基础。

### 3 讨论

本研究表明, 对于根系分区交替灌水和固定部分根区灌水两种局部灌水方式, 各阶段不同处理时期, 灌水区土-根系统总水分传导及单位根面积和单位根长水导均较均匀灌水的 1/2 根区显著增大, 灌水区根系的水分吸收运输始终保持显著的补偿效应。Poni 等的研究也表明, 苹果、葡萄、桃树和梨树的根系能从局部的水分有效区域吸水, 而且其吸水速率大大超过全部根区湿润时的速率<sup>[14]</sup>。这可能是植物对水分非均匀分布的适应性所致。一方面, 根系倾向于在水分有效性高的区域大量增殖<sup>[15, 16]</sup>, 以利于最大限度地获取其所需的水分与养分, 从而使植物资源的分配与利用实现最佳化; 另一方面, 部分根系处于干旱条件时, 植物体内会诱导产生干旱信号脱落酸(ABA), 而 ABA 具有调节水通道蛋白活性、增加根系水分传导的功能<sup>[4, 17]</sup>。Steudle 认为, 水通道蛋白可能充当阀门而可逆地提高植物的水分传导, 在不利的条件下促使植物吸水<sup>[18]</sup>。

尽管固定部分根区灌水和根系分区交替灌水均可以显著刺激根系吸收水分的补偿效应, 但两种灌水方式对植物各部分根系生长生理活动的影响不同。本研究表明, 固定灌水条件下, 非灌水区土-根系统水分传导始终维持很低的水平。即这部分根系的水分吸收运输功能不能得到正常发挥, 进而会降低其养分吸收能力。固定灌水条件下植物的氮素吸收主要来源于灌水区的的结果即说明了这一点<sup>[19, 20]</sup>。不仅如此, 长期干旱还会影响这部分根系的其他生长生理活动, 甚至导致根系的衰老死亡<sup>[21, 22]</sup>。而交替灌水由于不同根区轮流供应水分, 不会导致某一根区长期严重缺水, 既可以发挥局部供水诱导根系吸水的补偿效应, 还可以充分调动各部分根系资源的吸收运输功能, 满足作物的水分、养分需求, 是一种较理想的灌水方式。

### 4 结论

通过对传统均匀灌水、固定部分根区灌水和根系分区交替灌水 3 种方式下各根区土-根系统水分传导及其动态变化的系统研究, 获得以下主要结论:

1) 3 种灌水方式下, 总水导随时间的变化均符合线性关系, 单位根面积和单位根长水导随时间的变化呈二次抛物线型。

2) 固定灌水和交替灌水均可以显著增强灌水区土

-根系统水分传输的补偿效应。

3) 固定灌水条件下, 灌水区水导始终显著大于非灌水区; 交替灌水条件下, 两个根区的水导呈交替变化。与固定灌水相比, 交替灌水非灌水区的土-根系统水分传导明显增大。因此, 从长远来看, 交替灌水较之固定灌水能均衡利用各部分根系资源以满足作物的需水要求。

#### [参 考 文 献]

- [1] 康绍忠, 张建华, 梁建生. 土壤水分和温度共同作用对植物根系水分传导的效应[J]. 植物生态学报, 1999, (3): 211-219.
- [2] North G B, Nobel P S. Changes in hydraulic conductivity and anatomy caused by drying and rewetting roots of *Agave deserti*(Agavaceae)[J]. *Am. J. Bot.*, 1991, (78): 906- 915.
- [3] North G B, Nobel P S. Radial hydraulic conductivity of individual root tissues of *Opuntia ficus-indica* (L) Miller as soil moisture varies[J]. *Annals of Botany*, 1996, 77 (2): 133- 142.
- [4] Zhang J, Zhang X, Liang J. Exudation rate and hydraulic conductivity of maize roots are enhanced by soil drying and abscisic acid treatment[J]. *New Phytologist*, 2003, 131 (3): 329- 336.
- [5] Wilkinson S, Davies W J ABA-based chemical signaling: the co-ordination of responses to stress in plants [J]. *Plant Cell Environ*, 2002, 25: 195- 210.
- [6] Kang S, Liang Z, Hu W, et al. Water use efficiency of controlled root - division alternate irrigation on maize plant[J]. *Agricultural Water Management*, 1998, 38: 69- 76.
- [7] Stone J F, Nofziger D L. Water use and yields of cotton grown under wide- space furrow irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 1993, 24: 17- 28.
- [8] Stoll M, Loveys B, Dry P. Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigated grapevine[J]. *J Exp Bot*, 2000, 51: 1627- 1634.
- [9] 康绍忠, 张建华. 不同土壤水分与温度条件下土根系统中水分传导的变化及其相对重要性[J]. *农业工程学报*, 1997, (2): 76- 81.
- [10] Ali I A, Kafkafi U, Sugimoto Y, et al. Response of sand-grown tomato supplied with varying ratios of nitrate/ammonia to constant and variable root temperatures[J]. *J Plant Nutri*, 1994, 17(11): 2001- 2024.
- [11] McWilliam J R, Kramer P J, Musser R L. Temperature-induced water stress in chilling-sensitive plants[J]. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1982, (9): 343- 352.
- [12] 张喜英. 作物根系与土壤水利用[M]. 北京: 农业出版社, 1997.
- [13] Fusseder A. The longevity and activity of the primary root of maize[J]. *Plant Soil*, 1987, 101: 257- 265.
- [14] Poni S, Tagliavini M, Neri D, et al. Influence of root

- pruning and water stress on growth and physiological factors of potted apple, grape, peach and pear trees[J]. *Sci Hortic*, 1992, (52): 223– 226.
- [15] Ben-Asher J, Silberbush M. Root distribution under trickle irrigation: factors affecting distribution and comparison among methods of determination[J]. *J Plant Nutr*, 1992, 15: 783– 794.
- [16] Gallardo M, Turner N C, Ludwig C. Water relations, gas exchange and abscisic acid content of *Lupinus cosentinii* leaves in response to drying different proportions of the root system[J]. *J Exp Bot*, 1994, 45: 909– 918.
- [17] Hose E, Hartung W. The effect of abscisic acid on water transport through maize roots[J]. *J Exp Bot*, 1999, 50 (Supp): 40– 51.
- [18] Steudle E. Water uptake by roots: effects of water deficit [J]. *J Exp Bot*, 2000, 51: 1531– 1542.
- [19] Lehrsch G A, Sojka R E, Westermann D T. Nitrogen placement, row spacing, and furrow irrigation water positioning effects[J]. *Agron J*, 2000, 92: 1266– 1275.
- [20] 胡田田, 康绍忠, 张富仓. 局部供水方式对玉米不同根区氮素吸收与利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(11): 2290– 2295.
- [21] 康绍忠, 潘英华, 石培泽, 等. 控制性作物分区交替灌溉的理论及试验[J]. *水利学报*, 2001, (11): 80– 86.
- [22] North G B, Nobel P S. Drought-induced changes in hydraulic conductivity and structure in roots of *Ferocactus acanthodes* and *Opuntia ficus-indica* [J]. *New Phytologist*, 1992, 120: 9– 19.

## Effects of localized irrigation model on hydraulic conductivity in soil-root system for different root-zones of maize

Hu Tiantian<sup>1</sup>, Kang Shaozhong<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Hydraulic and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

2. The Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Effects of localized irrigation model on hydraulic conductivity in soil-root system for different root-zones of maize grown in split-root containers were analyzed. Three irrigation treatments, namely, conventional water irrigation treatment(C), fixed partial root-zone irrigation treatment(F), alternative partial root-zone irrigation treatment(A), were adopted hydraulic conductivity of whole and a half root-zone, and hydraulic conductivity per root area and per root length were studied. Results show that, compared with each half root-zone of the control, the hydraulic conductivity in soil-root system for irrigated root-zone under the A and F treatments increase significantly at both the 5th and the 10th days of each treatment. Localized irrigation can increase the compensatory effect of water transport in soil-root system. For F treatment, the hydraulic conductivity of the irrigated root-zone is always markedly higher than that of the non-irrigated root-zone. As for A treatment, the hydraulic conductivity of two root-zones alternatively changes. The hydraulic conductivity of the non-irrigated root-zone increases significantly for A treatment compared with F treatment. Alternative partial root-zone irrigation treatment can use all root system resources better to satisfy crop water requirement.

**Key words:** localized irrigation model; different root-zones; hydraulic conductivity in soil-root system; compensatory effect; maize