

## 分根区垂向交替供水的节水机理及效应<sup>3</sup>

史文娟

(西安理工大学)

康绍忠

(西北农林科技大学)

王全九

(西安理工大学)

**摘要:** 为了探索一种新的节水灌溉技术——分根区垂向交替供水的节水增产效应,以盆栽玉米为试验材料,选用 3 种不同的灌水方式(表面灌、下部灌、交替灌)和不同的灌水周期(3 d、5 d、7 d)以及不同灌水方式下的相同灌水量组合进行了对比试验研究。结果表明,垂向交替供水是可行的。在相同的水势条件下,交替灌可提高作物的渗透调节能力,降低气孔关闭的临界水势,使光同化产物从营养器官向生殖器官的分配增加,整株作物的长势呈现出苗壮、根旺的特点。此外,5 d 的交替灌与 3 d 的表面灌相比,不仅作物的长势明显改善,且节水 26% 以上;7 d 的交替灌与 5 d 的表面灌相比,作物长势无明显差异,但节水 20% 以上。试验的最终结果认为:5 d 的灌水周期是试验范围内交替灌应用时较为成功的方式。当以土壤含水率控制时,拔节期下层土壤含水率应不低于 54% 的田持,上层土壤含水率应不低于 40% 的田持。

**关键词:** 垂向分根区交替灌溉; 补偿效应; 根源信号“ABA”; 渗透调节; 临界水势; 水分利用效率

控制性分根交替灌(Control Root Split Alternative Irrigation 简称 CRAI)是康绍忠等<sup>[1]</sup>(1997)提出的一种新的节水灌溉技术,它的基本含义就是利用作物水分胁迫时产生的根信号功能,人为保持根系活动层的土壤在水平或垂直剖面的某个区域干燥,同时通过人工控制使根系在水平或垂直剖面的干燥区域交替出现,这样始终生长在干燥或较为干燥土壤区域中的一部分根系会产生水分胁迫信号有效地调节气孔关闭,而湿润区的一部分根系从土壤中吸收水分以满足作物生命之需的最小水量,同时交替供水后表层土壤总是间歇性地处于干旱处,从而减少了棵间一直湿润时的无效蒸发损失和总的灌水量,从而达到节水而不牺牲光合产物累积的目的<sup>[1]</sup>。在过去的 2 年中,通过室内的和田间的试验,已经证明了控制性分根交替灌水技术(水平方向)与常规灌溉相比可达到节水 30% 以上的效果<sup>[2]</sup>,是一项节水潜力很大的灌水新技术,而对于垂直方向交替灌水技术由于实现难度较大还未进行具体的试验研究。基于这一点,我们于 1998 年利用人工模拟土柱试验进行了此项研究,旨在探索此种新的节水灌溉技术在理论上和应用上的可行性及节水

增产的效果,并就其节水增产的机理做了初步的探讨。

### 1 材料与方法

试验地设于农业部农业水土工程重点开放实验室具有防雨设施的大田中,土柱管为聚乙烯材料(PVC)合成,高 50 cm,口径 11 cm,土柱两侧每隔 10 cm 打一小孔,以调节通气状况。下部灌和交替灌土柱中的供水管头用填有小石子的细纱布包裹,防止灌水时发生堵塞。在装土前,PVC 管从垂直方向被分成两半,再用防水胶布紧密地粘合在一起以利于不同生育期根的取样,每盆装过筛的均匀耕层干土 4.5 kg,土壤中伴有均匀的数量相同的 NPK 复合肥,土壤容重为 1.15 g/cm<sup>3</sup>,土质为黑垆土,其田间持水量为 0.28。土柱上下层各埋有一根 20 cm 长的波导线用于灌水前后土壤含水率的测定。供试作物为夏玉米(陕单 9 号),7 月 20 号播种,每个土柱 4 棵,待长至 2 叶后,留长势均匀的植株各 1 棵。

交替供水处理从拔节期开始,分 3 d、5 d、7 d 3 种灌水周期,每种灌水周期又分为表面灌(图 1a)、下部灌(图 1b)和上下交替灌(图 1c)3 种灌水方式,即为 9 种处理,每种处理设 8 个重复。每种灌水间隔时间、不同灌水方式的灌水量相同,且每次只灌接近水源的一半土柱高度,即表面灌的灌水区域为上层 1/2 土柱高度,下部灌为下层 1/2 土柱高度,交替灌为上下层土柱交替进行。处理期间灌水量由灌水前

收稿日期:199906220 修订日期:200008215

3 原西北农业大学课题“水利部、农业部 98 交替灌溉节水技术”的部分内容

史文娟,助教,西安市金华南路 5 号 西安理工大学水资源研究所,710048

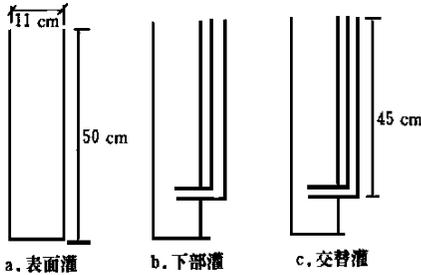


图 1 不同灌水方式的试验装备示意图

Fig 1 The test equipment of different water supply methods

所测定的同一灌水周期 3 种灌水方式中最低的土壤含水率求得。处理前土壤含水率为 60%~70% 田间持水量 (H)。处理前后作物的播种、施肥等管理措施完全一致。

土壤含水率用时域反射仪 (TDR) 测定, 光合速率、蒸腾速率、气孔阻力、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度等生理指标用 CD 2301PS 便携式光合测定系统测定。叶面积和植株高度用直尺量测。叶水势、渗透势用热电偶湿度计测定。与上述指标同步, 测定 2~3 个重复的地上、地下干物重、鲜重等指标, 取样时间与测定时间相

同。作物耗水量由水量平衡方程计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 CRA I 对玉米生长发育及根冠比的影响

#### 2.1.1 CRA I 对玉米株高和叶面积的影响

图 2 表明, 处理前所有玉米的株高长势是很均匀的, 在处理开始后即发生变化, 交替灌和下部灌的株高增长幅度明显下降, 表面灌的植株保持明显的优势。随处理时间的延长, 各处理株高差异增大, 交替灌的株高在拔节后期至抽雄期都明显大于相同灌水量下的表面灌和下部灌。灌水间隔时间愈长, 各处理株高及其之间的差异愈小, 但交替灌的株高仍具有一定的优势。同时也不难看出, 在拔节后期, 5 d 的交替灌株高于 3 d 的表面灌和下部灌的株高, 7 d 的交替灌和 5 d 的表面灌株高无明显差异。

叶面积的变化趋势与株高基本一致, 只是不同处理的叶面积变化幅度大于株高的变化幅度。交替灌对叶面积和株高的明显促进作用主要在拔节后期和抽雄期, 这对于后期产量的形成以及水分和养分的充分利用都是极为有利的。

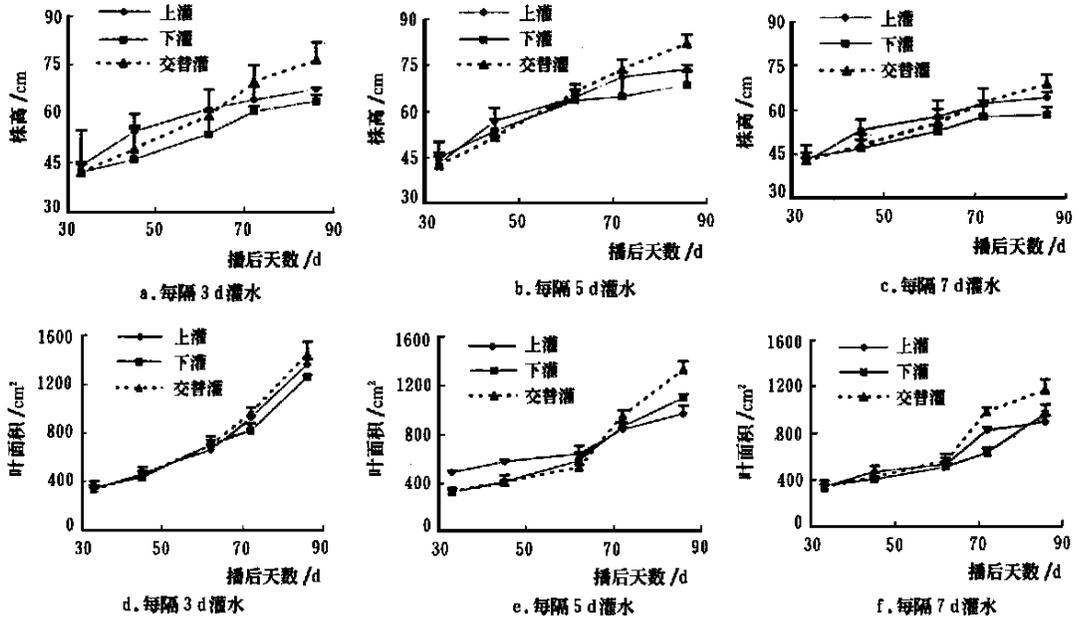


图 2 不同灌水周期的株高和叶面积生长曲线

Fig 2 The plant height and leaf area with different water supply periods

#### 2.1.2 生育期内玉米根系和土壤含水率的垂直剖面分布情况

对玉米不同生长时期, 采用不同灌水方式比较根系鲜重及土壤含水率, 结果显示: 在拔节前期

70% 以上的根系主要分布在土柱上层, 下层根系分布较少。随灌水间隔时间的延长, 尽管总根量呈下降的趋势, 但下层根系所占比重却逐渐增加, 尤以交替灌表现得更为突出。随生育期的发展, 交替灌下层根

量增加的比例及绝对数量比表面灌和下部灌表现得更为显著。由此可见, 即使在相同的灌水量情况下, 采用不同的灌水方式也会使根系的生长和分布发生明显改变, 表面灌的根系分布浅而集中; 下部灌的根系分布比较深, 但根量较少; 交替灌可使根系在土壤中的分布更为均匀且总根量明显增加。

从试验得出的含水率的分布情况可以看出: 表面灌水的土壤含水率分布与根系的动态分布始终较为吻合, 而下部灌和交替灌的含水率分布与根系分布状态由开始的差距较大到最后的差距逐渐缩小, 此种现象充分说明, 水分对作物根系的诱导作用及作物的生长对水分的反应不仅与土壤含水率有关而且与不同灌水方式形成的土壤含水率的分布有关。在相同的灌水量条件下, 交替灌的土壤含水率变化幅度要比表面灌的变化缓和得多。

### 2.1.3 CRA I 对地上、地下干物质分配量及根冠比的影响

表 1 结果显示, 不同灌水方式显著改变干物质

在根冠间分配比例。灌水间隔时间愈长, 分配到根系的干物质比例愈大, 根冠比愈大, 这与以往的结论一致<sup>[4,5]</sup>。在相同的灌水量情况下, 拔节前期 3 种灌水方式的根冠比次序依次为: 下部灌 > 交替灌 > 表面灌。而拔节后期根冠比的测定结果为, 表面灌 > 下部灌 > 交替灌。同时根系生长量的情况表明, 交替灌的绝对根量在拔节后期和抽雄期都明显大于相同灌水量下的表面灌和下部灌。显然, 交替供水处理更有利于碳水化合物向生殖器官运转和分配, 从而使植株的长势呈现出苗壮根旺的特点。

### 2.2 CRA I 对光合、蒸腾、气孔导度及胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的影响

从表 2 可以看出, 处理前的光合速率、蒸腾速率和气孔导度等各项指标都基本接近。处理开放后, 光合速率、蒸腾速率及气孔导度急剧下降, 而胞间 CO<sub>2</sub> 却呈明显增加的趋势, 且 3 d 和 5 d 的交替灌胞间 CO<sub>2</sub> 浓度增加的幅度都小于相同灌水量下的表面灌和下部灌。随处理时间的延长, 光合速率开始回升,

表 1 不同灌水方式的根冠比

Tab 1 The ratio of root to shoot with different irrigation methods

生育阶段 (年2月2日)	灌水方法	干根质量ög			F 检验	干冠质量ög			F 检验	根冠比		
		3 d	5 d	7 d		3 d	5 d	7 d		3 d	5 d	7 d
拔节前期 (1998209215)	下部灌	1.28	1.59	1.10	不显著	5.64	6.16	4.78	3.3	0.227	0.258	0.230
	表面灌	1.52	1.67	1.29		8.62	9.64	5.15		0.176	0.173	0.250
	交替灌	1.28	1.47	1.39		7.01	7.36	5.98		0.183	0.200	0.232
拔节后期 (1998209230)	下部灌	1.46	2.16	1.52	3.3	7.65	8.62	7.70	3.3	0.191	0.260	0.197
	表面灌	2.20	1.75	1.70		10.30	8.62	7.80		0.214	0.203	0.218
	交替灌	2.75	2.93	2.32		12.75	14.8	11.30		0.190	0.197	0.205
抽雄期 (1998210214)	下部灌	2.08	2.55	1.81	3	10.22	10.98	9.78	3.3	0.204	0.234	0.185
	表面灌	2.97	2.13	2.35		10.67	10.60	8.82		0.194	0.201	0.232
	交替灌	2.93	3.01	2.50		13.11	15.10	10.97		0.223	0.201	0.228

表 2 不同处理的光合速率、蒸腾速率、气孔导度及胞间 CO<sub>2</sub> 浓度

Tab 2 The photosynthesis, evaporation, stomatal conductance and cell CO<sub>2</sub> concentration with different treatments

处理	$P_n \text{ } \mu\text{mol l}^{-1} \text{ (m}^2 \text{ s)}^{-1}$				$ET \text{ } \text{mmol l}^{-1} \text{ (m}^2 \text{ s)}^{-1}$				$C_s \text{ } (\text{mol l}^{-1} \text{ cm)}_1 \text{ s}^{-1}$				$C_i \text{ } 10^{-6}$				
	处理前	处理前期	处理后期	抽雄期	处理前	处理前期	处理后期	抽雄期	处理前	处理前期	处理后期	抽雄期	处理前	处理前期	处理后期	抽雄期	
3 d	表面灌	13.8	2.2	8.1	4.5	3.0	0.9	1.1	0.8	0.091	0.017	0.061	0.058	194	236	283	335
	下部灌	12.7	1.9	6.6	3.1	2.5	0.8	1.0	0.9	0.081	0.020	0.056	0.044	202	211	303	345
	交替灌	17.6	0.3	17.0	3.0	4.0	0.8	0.9	0.3	0.143	0.022	0.046	0.010	240	376	81	123
5 d	表面灌	13.6	3.1	7.6	6.9	2.7	1.0	0.9	1.1	0.109	0.023	0.097	0.064	207	231	335	307
	下部灌	23.1	8.5	5.9	5.3	5.0	1.6	1.1	0.8	0.122	0.040	0.069	0.039	200	223	334	273
	交替灌	15.0	17.7	21.0	7.5	2.7	3.1	1.3	1.1	0.126	0.100	0.079	0.055	301	184	183	282
7 d	表面灌	21.2	0.4	3.4	2.9	4.5	0.3	0.8	0.6	0.142	0.008	0.030	0.032	221	331	293	325
	下部灌	19.7	2.1	2.5	6.0	3.6	0.7	1.4	0.8	0.126	0.030	0.093	0.093	210	332	379	348
	交替灌	17.0	4.8	11.9	5.2	3.9	1.2	1.2	0.8	0.110	0.034	0.078	0.053	238	230	266	314

但交替灌的光合速率回升的幅度明显大于表面灌和下部灌。在拔节后期(9月30日左右),交替灌的光合速率与表面灌和下部灌的光合速率已呈显著性差异。随灌水周期的延长光合速率呈总体下降的趋势。蒸腾速率和气孔导度随处理时间的延长增加的幅度变小,且3种灌水方式之间无显著性差异。由此推测,根源信号“ABA”对气孔行为进行了有效的调节,从而使蒸腾大幅度降低,而光合维持较高的水平。胞间CO<sub>2</sub>浓度除7d的灌水方式外都明显降低,且交替灌降低的幅度较大。说明处理后期,表面灌和下部灌的水分亏缺程度相对严重,非气孔因素占据主导地位;交替灌的非气孔因素限制作用降低<sup>[6]</sup>,气孔对光合速率的调节作用增强,作物的水分状况相对改善。

### 2.3 水势与气孔导度的关系

图3的结果表明,随着叶水势的降低,气孔导度逐渐下降。但在相同的叶水势条件下,交替灌与其它两种灌水方式相比有更低的气孔导度值。叶水势愈低,此现象表现得愈明显。说明交替灌降低了气孔关闭的临界阈值。而阈值越低,则表示气孔对干旱的忍耐力越大<sup>[8]</sup>,同时阈值越低达到最大WUE的可能性愈大。

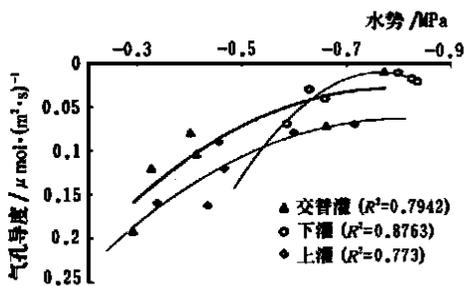


图3 叶水势与气孔导度的关系

Fig 3 The relationship of leaf water potential and the stomatal conductance

### 2.4 渗透调节作用

图4表明:膨压随水势的降低而降低,但在相同的水势条件下,膨压的依次顺序为,交替灌>表面灌>下部灌。且随着水势的进一步减小,交替灌和下部

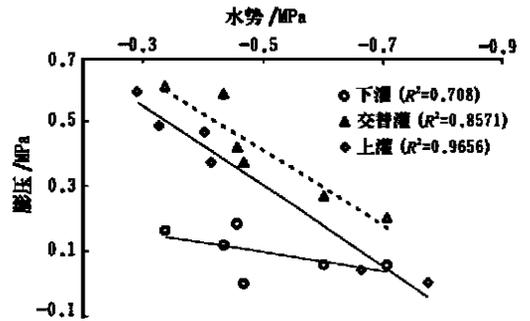


图4 叶水势与膨压的关系

Fig 4 The leaf potential and turgor pressure

灌的膨压变化幅度减小都小于表面灌,而下部灌是所有3种灌水方式中膨压变化幅度最小的。从膨压与水势的相互关系可知:交替灌溉的作物具有更强的渗透调节能力,且水分亏缺愈严重,其潜在的对干旱的相对适应能力愈强。下部灌的作物尽管相对的渗透调节能力更强,但因其绝对膨压的明显降低,仍会对作物造成巨大的伤害。

### 2.5 CRA I对玉米产量及水分利用效率的影响

表3结果显示,在相同的灌水量条件下,交替灌的干物质总量和水分利用效率与其它2种处理相比都明显增加。随灌水周期延长,表面灌和下部灌的干物质总量呈下降趋势,而交替灌却呈现出先增后降的趋势,可见在土壤含水率水平较低的情况下,交替灌仍能保持作物的良好生长势头。除此之外还可以看出,7d的交替灌与5d的表面灌相比其作物的生长量无明显差别,但节水20%;同时5d的交替灌又比3d的表面灌和下部灌作物的生物产量分别提高了32.7%和47.2%,且节水26%和26.2%以上。从总体趋势来看,5d交替灌不仅作物产量最高,且WUE也是所有处理中最高的。

表3 不同灌水方式的玉米产量和水分利用效率

Tab 3 The yield and water use efficiency with different water supply methods

处理	表面灌			下部灌			交替灌			F 检验
	3 d	5 d	7 d	3 d	5 d	7 d	3 d	5 d	7 d	
总灌水量 $\bar{\alpha}$	10 529	7 800	6 253	10 529	7 800	6 253	10 529	7 800	6 253	
耗水量 $\bar{\alpha}$	10 532	7 788	6 240	10 526	7 796	6 230	10 523	7 787	6 253	
干物质质量 $\bar{\alpha}g$	13 64	12 73	10 87	12 30	13 53	11 59	16 04	18 11	13 47	3 3
WUE $\bar{\alpha}g \cdot m^{-3}$	1.295	1.635	1.742	1.170	1.736	1.86	1.524	2.326	2.160	

### 3 结 论

1) 交替灌在一定范围内能够刺激根系生长, 使根系在土壤剖面分布更为均匀。整个植株处于根冠协调的状态。

2) 交替灌可以有效控制  $ET$ , 而使  $P_n$  保持较高的水平, 这与根源信号 ABA 对气孔行为的调节有关。

3) 土壤反复干湿交替能够增强玉米渗透调节能力和对土壤干旱的适应, 降低气孔半闭与阈值, 使作物水分状况改善, 气孔的调节能力增强, 非气孔限制作用下降。

4) 在试验范围内 5 d 的交替灌是较为理想的。从土壤含水率的剖面分布可以看出, 当以含水率控制灌水量时, 土壤应保持在 40% H 以上。下层土壤应保持 54% H 以上。

#### [参 考 文 献]

[1] 康绍忠, 张建华等. 控制性交替灌——一种新的农田节

水调控思路 干旱地区农业研究, 1997, 15(1): 1~ 5

- [2] 梁宗锁, 康绍忠, 张建华. 控制性分根交替灌水的节水效应 农业工程学报, 1997, 4, 58~ 63
- [3] W S Meyer, H D Barrs. Roots in irrigated clay soil: measurement techniques and responses to rootzone conditions Irrig Sci, 1991(12): 125~ 134
- [4] J Z Shi and T D Wang. Simulation of shoot:root ratio changes during vegetative phase and affected by environmental factors Acta Photophysiological Sinica, 1995, 21(4): 13~ 323
- [5] T C Hsiao. Plant response to water stress Ann Rev Plant Physical, 1979, 71
- [6] 邹 琦. 植物光合作用的气孔与非气孔限制 见: 作物抗旱生理生态研究 济南: 山东科技出版社, 1994
- [7] E D Schulze. Whole plant responses to drought Aust J Plant Physiol, 1986, 13: 127~ 141
- [8] 马忠明. 有限灌溉条件下作物—水分关系的研究 干旱地区农业研究, 1998, 16(2): 75~ 79

## Mechanism and Water-Saving Efficiency of Alternate Watering in Vertical Profile

Shi Wenjuan

Kang Shaozhong

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

(Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry)

Wang Quanjiu

(Xi'an University of Technology)

**Abstract:** Under the condition of control test, by cultivating in pots containing soil, with maize as material, the new water-saving technology which was named the Control Root-split Alternate Irrigation (CRA I) was studied. The treatment included Surface Irrigation (SI), Low Irrigation (LI) and CRA I (CA I). The period of irrigation was 3d, 5d and 7d, separately. The watering amount was the same with the same period of irrigation. The result showed that the distribution model of carbohydrate was changeable. And more photosynthetic products were transformed to shoot. Besides, Crop growth of CA I with 5 days was improved than that of SI with 3 days and water use efficiency ( $WUE$ ) was increased by 26%. Although no difference was found between the crop growth of CA I with 7 days and that of SI with 5 days,  $WUE$  was increased by 20%. On the other hand, crop growth of SI showed a much severe inhibition in the later of jointing stage as compared with LI and CA I. It was found that the critical water potential of CA I and osmoregulation capacity was raised. This was the probable reason why yield and  $WUE$  was improved of CA I.

**Key words:** alternate watering in vertical profile; compensative effect; root signal "ABA"; osmoregulation; critical water potential; water use efficiency