

交替隔沟灌溉水分入渗规律及其对作物水分利用的影响

潘英华

康绍忠

(中科院 水利部水土保持研究所) (西北农业大学)

摘要: 以玉米为试验材料, 通过大田灌水技术和灌溉制度试验对交替隔沟灌溉水分入渗规律及其对作物水分利用的影响进行了研究。结果表明, 交替隔沟灌溉与常规灌溉相比, 水分的侧向入渗比较明显, 由于其湿润锋到达深度小于常规灌溉, 因此, 交替隔沟灌溉可以减少土壤水分的深层渗漏, 交替隔沟灌溉不降低光合速率而蒸腾速率有所下降, 并有利于提高蒸腾效率; 在同等灌水量水平下, 交替隔沟灌溉因为其低蒸腾和较高产量总水分利用率和灌溉水利用效率均高于常规灌溉; 在同等灌水量水平下, 采用交替隔沟灌溉不降低玉米产量; 收获等产量的玉米, 交替隔沟灌溉比常规灌溉省水 33.13%。

关键词: 交替隔沟灌溉; 水分入渗; 水分利用

控制性分根交替灌溉是康绍忠、张建华等 (1997)^[1] 根据作物光合作用、蒸腾失水与叶片气孔开度的关系以及干旱条件下的根系信号传递与其对气孔调节的机制提出了作物根系分区交替灌溉这种新的农田节水灌溉技术, 交替隔沟灌溉是其中的一种形式。提出这一概念的理论依据是: 植物的气孔开度由充分灌水逐渐过渡到亏缺状况时, 蒸腾作用下降快而光合作用下降缓慢; 局部干燥区域的根系可产生一种根信号, 主要是脱落酸 (ABA), 能帮助作物改变气孔开度和调节其水分消耗; 交替控制使部分根系经受一定程度的水分胁迫, 能改善土壤的通透状况并提高根系的传导能力和吸收功能。

对控制性作物分根交替灌水技术的研究在国外尚未发现。在国内, 康绍忠、梁宗锁等^[2,3] 以玉米为材料, 通过人工气候室内的盆栽作物控制性分根交替灌水试验, 证明当土壤含水率为田间持水量的 55% ~ 65% 时, 控制 102 根区交替灌水其用水量减少 34.14% ~ 36.18%, 而生物量仅下降 6% ~ 12%, 水分利用效率、根冠比、茎秆基部直径均有明显增加; 气孔阻力明显增加, 叶片蒸腾速率明显下降, 蒸腾效率提高而光合速率未明显变化; 叶面积、叶片数目、叶片含水量与对照无差异, 控制 102 根系区域交替灌水比固定 102 区域灌水的用水效率明显提高, 根系总量和根冠比增加, 根系分布均匀, 地上部生物量和

植株茎秆直径增加。初步证明了控制性分根交替灌水技术是一种切实可行的节水新技术。1997 年, 在甘肃河西民勤沙漠绿洲区的大田试验结果表明, 大田控制性分根交替隔沟灌溉其定额由常规灌溉的 $3\ 150\ \text{m}^3/\text{öhm}^2$ 减少到 $2\ 100\ \text{m}^3/\text{öhm}^2$ 时, 产量无明显变化。但当灌溉定额减少到 $1\ 575\ \text{m}^3/\text{öhm}^2$ 时, 产量下降较明显。一方面是由于水分供应不足, 另一方面则是由于灌水定额降低后, 从灌水技术上难以保证, 以致于灌水不均匀所产生的。因此, 如何确定作物控制性分根交替隔沟灌溉水流的入渗性能, 加速沟中水流推进过程, 提高灌溉水流沿沟长方向入渗的均匀度, 是提高田间水利用率的关键。为了推广应用控制性作物分根交替隔沟灌溉技术, 提高田间水分利用效率, 必须对该技术条件下的沟中灌溉水分入渗规律和灌水技术进行研究。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验区位于甘肃河西民勤小坝口试验站, 东经 $103\ 03'$, 北纬 $38\ 05'$, 属干旱地区。气候干燥, 降雨量少, 蒸发强烈。多年平均降水量在 110 mm 左右, 且多为 5 mm 以下的无效降水, 7~9 月的降水占全年降水的 60%, 年蒸发量 2 644 mm, 是降水量的 25 倍。日照时数 3 010 h 以上, 大于 $10\ ^\circ\text{C}$ 的积温 3 147.18。地下水埋深为 13~18 m。试验区土质为砂壤土, 有机质含量中等, 1 m 土层内田间持水量为 22.12% ~ 23.15% (重量百分数), 土壤剖面上平均容

收稿日期: 1999-09-20

潘英华, 博士生, 陕西杨陵区西农路 26 号 中科院 水利部水土保持研究所, 712100

重为 1145~1148 g \ddot{O} cm³。

112 材料和方法

试验采用垄植沟灌的方法种植地膜玉米。沟断面采用梯形形式。播种时间在 4 月 11~20 日。玉米播种后立即用幅宽 120 cm 地膜将垄覆盖,在沟底紧膜压实。按照灌水要求,为控制入沟水量,试验时每条沟的末端都打上土埂,避免水从沟尾流出。结合灌水技术试验,在试验区内同时进行灌溉制度试验,试验设计 3 个处理 3 个重复,共 27 个小区。3 种灌水方式为:常规灌溉、固定隔沟灌溉、交替隔沟灌溉。3 个灌水量水平分别为 3 150 m³ \ddot{O} hm²、2 100 m³ \ddot{O} hm²、1 575 m³ \ddot{O} hm²,每个小区面积为 50 m²。在玉米生育期内灌水 7 次,灌水时间为:苗期(199815131)、拔节期(199816117)、大喇叭口(19981712)、抽雄期(199817116)、抽穗期(199817130)、灌浆中(199818110)、乳熟期前(199818119)。

113 测定项目

1) 土壤含水率 土壤含水率利用南京产 LNW 250A 型中子土壤水分仪测定。对于常规灌溉,中子管理设在灌水沟和垄的中心轴线上;固定隔沟灌溉

中子管理设在灌水沟、垄和非灌水沟中;交替隔沟灌溉中子管理位置与固定隔沟灌溉相同。3 种灌水方式中子管理深均为 110 cm,剖面上土壤水分的测定深度为 1 m,每 20 cm 为一层,分 5 层测定。为研究沿沟长方向含水率分布情况,将灌水沟每 10 m 设一个测定点,每个测定点处都埋设中子管。在灌水前沿沟长方向定点测量土壤含水率在剖面上的分布情况。灌水后水分入渗过程中,隔一定时间(1 h 或 2 h)利用中子水分仪测量各测点剖面上水分动态。水分入渗完成后,对土壤水分进行连续 3 d 的测定,表层土壤含水率采用烘干法测定。

2) 光合速率、蒸腾速率 光合速率和蒸腾速率用 CD 2301PS 便携式光合作用测定系统测定。

2 结果与分析

211 3 种灌溉方式剖面同一层次土壤水分动态

1) 通过实际测定数据分析,剖面同一层次(此处用土层深度为 30 cm 的土壤含水率资料)土壤水分的动态变化情况如图 1 所示。

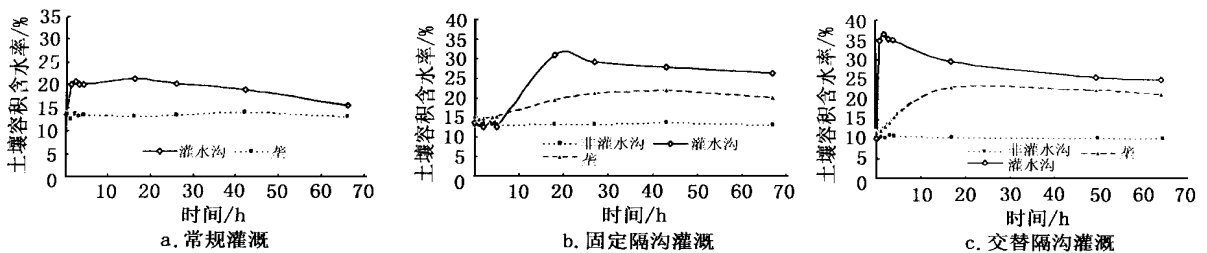


图 1 剖面同一层次($Z=30$ cm)土壤水分动态

Fig11 Soil water dynamic of same soil layer ($Z=30$ cm)

从图 1 看出,对于 3 种灌水方式,同一层次中随时间延长含水率有增大趋势。当沟中水分入渗完毕后,由于植物根系的吸收、蒸发以及水分在土壤剖面上的再分布,含水率在达到一最大值后逐渐下降直到达到一稳定值;在灌水沟、垄、非灌水沟之间存在着水势梯度,水势梯度的存在使水分产生下渗和侧渗进入垄中,利于植物对水分的吸收。常规灌溉垄上含水率变化微小,而固定隔沟灌溉和交替隔沟灌溉垄上含水率随时间延长有增大的趋势,但其到达最高点的时间要比灌水沟迟;交替隔沟灌溉与固定隔沟灌溉干沟中含水率基本无变化,与灌水前沟中含水率基本保持在同一水平。

212 3 种灌水方式土壤水分再分布情况

在有地膜覆盖条件下,土壤水分的再分布属于

隔绝蒸发条件下土壤水分再分布情况。根据 3 种灌水方式田间测得的土壤含水率资料绘出再分布过程图(图 2)。

从图 2 看出,对于 3 种灌水方式,灌水沟中水分入渗完成后土壤水分再分布过程的水分剖面可以分为 3 个区:释水区、吸水区和含水率稳定区。土壤积水入渗完成后,水分在剖面上的运动没有立即终止。入渗刚一结束,上层含水率接近饱和的土壤便开始释水,在重力和土壤水势梯度的作用下水分继续向土壤深层移动,含水率减小,处于脱湿状态,形成释水区,而释水区以下到入渗湿润锋面之间的土层则含水率仍在增加,处于吸湿状态成为吸水区;湿润锋面以下的土层含水率稳定不变。随着再分布时间的延续,释水区不断加深,湿润锋也逐渐下移,但下移

的速度缓慢, 且湿润锋愈加不明显, 再分布的速率逐渐减小。这是由于释水区的水分不断流入吸水区, 使吸水梯度减小, 释水区导水率降低, 而且湿润锋处的吸力梯度也在减小。另外, 从 3 种灌水方式的土壤水分再分布图中也可看出湿润锋到达的位置。常规灌溉灌水沟湿润锋在 70~ 90 cm 土层; 固定隔沟灌溉

和交替隔沟灌溉灌水沟湿润锋位置在 50~ 70 cm 土层, 这一现象再次说明常规灌溉灌水沟由于受到相邻灌水沟的影响, 其侧向入渗同固定隔沟灌溉和交替隔沟灌溉相比不十分明显。也说明田间采用隔沟灌溉方式灌水有助于减少土壤水分的深层渗漏损失。

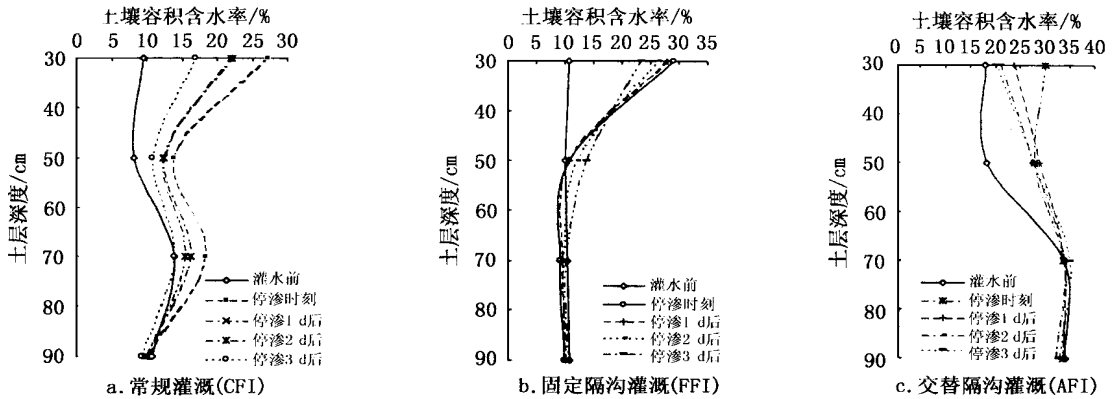


图 2 3 种灌水方式土壤水分在剖面上的分布情况

Fig12 Soil water distribution of three irrigation systems

213 不同灌水方式和灌水量对玉米 P_n , T_r 和 WUE 的影响^[4]

由表 1 可以看出, 在第 1, 2, 4, 5 次灌水前后同等灌水量下 3 种处理之间光合速率 P_n 并无显著差异。蒸腾速率 T_r 在 3 种灌溉方式处理的灌水量下每次灌水前差异不明显, 而灌水后灌水沟中含水量较高时蒸腾速率差异较大, 以常规全面积均匀灌水为最高, 其次为交替灌水各处理, 固定隔沟灌溉最低。由此可以证明隔沟灌溉每次供给同样水量时, 一半根区处于较高含水量而另一半根区处于较低含水量可以有效调节气孔开度, 光合速率不降低而蒸腾

速率下降明显, 有利于控制气孔充分张开时的奢侈性耗水。

从 P_n , T_r 和 WUE 总平均值变化可以看出, 在次灌水量为 $450 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时, 光合速率以常规灌溉最高, 交替隔沟灌溉为其次, 固定隔沟灌溉最低; 在次灌水量为 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 和 $225 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时, 交替隔沟灌溉最高, 常规灌溉与固定隔沟灌溉接近。蒸腾速率的比较可见有明显差异, 常规灌溉在各灌水量水平下均明显高于交替隔沟灌溉和固定隔沟灌溉, 随灌水量下降蒸腾速率减小, 但总趋势是相同的, 总平均值比较 3 种灌水方式仍以常规灌溉各处理最高,

表 1 3 种灌水方式灌水前后 P_n , T_r 和 WUE

Tab11 P_n , T_r and WUE of three irrigation systems before and after irrigation

| 测定项目 | 灌水方式 | 次灌水量 | | 灌水时间 | | | | | 平均值 |
|---|------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ | 一水前 | 一水后 | 二水前 | 二水后 | 四水后 | 五水前 | |
| 光合速率 P_n $(\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ | CFI | 450 | 1117 | 2018 | 1312 | 1913 | 2114 | 1013 | 1611 |
| | | 300 | 1018 | 1513 | 714 | 1613 | 1910 | 919 | 1219 |
| | | 225 | 617 | 1613 | 514 | 1413 | 1713 | 613 | 1111 |
| | FFI | 450 | 1316 | 1611 | 1213 | 1514 | 1715 | 1217 | 1416 |
| | | 300 | 916 | 1413 | 1013 | 1410 | 1611 | 1310 | 1219 |
| | | 225 | 910 | 1415 | 1010 | 1318 | 1314 | 1019 | 1013 |
| AFI | 450 | 1413 | 1613 | 1318 | 1619 | 1716 | 1514 | 1517 | |
| | 300 | 1213 | 1611 | 1219 | 1712 | 1610 | 1418 | 1419 | |
| | 225 | 1110 | 1512 | 1013 | 1614 | 1815 | 1313 | 1411 | |

续表

| 测定项目 | 灌水方式 | 次灌水量 | | | 灌水时间 | | | | 平均值 |
|---|------|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | $\bar{q}_m^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ | 一水前 | 一水后 | 二水前 | 二水后 | 四水后 | 五水前 | |
| 蒸腾速率 $Tr \bar{o} \text{Lmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ | CFI | 450 | 2196 | 5131 | 3121 | 6111 | 6173 | 3121 | 4105 |
| | | 300 | 2130 | 4196 | 2187 | 5180 | 5131 | 2196 | 4140 |
| | | 225 | 2112 | 5106 | 2133 | 6112 | 5124 | 2110 | 3183 |
| | FFI | 450 | 2172 | 3121 | 1194 | 4100 | 3145 | 2115 | 2191 |
| | | 300 | 2116 | 3142 | 1166 | 3191 | 3155 | 2146 | 2186 |
| | | 225 | 1152 | 3167 | 5160 | 3152 | 3128 | 2117 | 3129 |
| | AFI | 450 | 3101 | 4115 | 2189 | 4163 | 4124 | 2185 | 3162 |
| | | 300 | 2153 | 4116 | 2143 | 4151 | 4140 | 2136 | 3139 |
| | | 225 | 1196 | 3190 | 1174 | 3172 | 4110 | 2117 | 2193 |
| 蒸腾效率 $WUE \bar{o} \text{Lmol} \cdot (\text{Lmol} \cdot \text{s})^{-1}$ | CFI | 450 | 3195 | 3192 | 4112 | 3114 | 3118 | 3121 | 3198 |
| | | 300 | 4169 | 3108 | 2156 | 2181 | 3158 | 3135 | 3120 |
| | | 225 | 3119 | 3122 | 2132 | 2134 | 3130 | 3101 | 2189 |
| | FFI | 450 | 5100 | 5102 | 6134 | 3185 | 5107 | 5191 | 5103 |
| | | 300 | 4144 | 4118 | 6120 | 3158 | 4154 | 5128 | 4150 |
| | | 225 | 5192 | 3195 | 1179 | 3192 | 4107 | 5102 | 3113 |
| | AFI | 450 | 4175 | 3193 | 4178 | 3165 | 4115 | 5140 | 4134 |
| | | 300 | 4186 | 3187 | 5131 | 3181 | 3164 | 6127 | 4139 |
| | | 225 | 5161 | 3189 | 5192 | 4141 | 4151 | 6113 | 4182 |

注: 光合速率单位以 CO_2 计, 蒸腾速率单位以 H_2O 计, 蒸腾效率单位以每秒、每 $\text{Lmol H}_2\text{O}$ 所用 CO_2 量计。

交替隔沟灌溉次之, 固定隔沟灌溉最低。

由此可以认为, 交替隔沟灌溉不降低光合速率而降低蒸腾速率, 并有利于提高蒸腾效率。

2.14 不同灌水方式和灌水量对总水分利用效率和灌溉水利用率的影响

经分析计算后得到的试验结果列于表 2 中。

表 2 灌水制度区试验结果

Tab12 Experimental results of irrigation system plot

| 灌水方式 | 灌水定额 $\bar{q}_m^3 \text{ hm}^{-2}$ | 蒸腾 \bar{q}_m | 产量 $\bar{o} \text{ kg hm}^{-2}$ | $WUEET^3$ $\bar{o} \text{ kg m}^{-3}$ | $WUEI^3$ $\bar{o} \text{ kg m}^{-3}$ |
|------|---------------------------------------|-------------------|------------------------------------|--|---|
| CFI | 1 575 | 227124 | 7 90019 | 31477 | 51016 |
| | 2 100 | 280104 | 8 18117 | 21922 | 31896 |
| | 3 150 | 385125 | 8 36313 | 21171 | 21655 |
| FFI | 1 575 | 227118 | 6 96610 | 31066 | 41423 |
| | 2 100 | 278129 | 8 02518 | 21884 | 31822 |
| | 3 150 | 387124 | 8 27211 | 21140 | 21626 |
| AFI | 1 575 | 226164 | 8 13318 | 31589 | 51164 |
| | 2 100 | 281183 | 8 41418 | 21986 | 41007 |
| | 3 150 | 387161 | 8 69413 | 21243 | 21760 |

3 注: 总水分利用效率 ($WUEET$) = 产量 \bar{o} 蒸腾, 灌溉水利用效率 ($WUEI$) = 产量 \bar{o} 灌溉水量。

从表 2 中可以看出, 在灌水量相同的情况下, 蒸

腾不受灌水方式的影响。对于常规灌溉, 蒸腾量的增大并没有使玉米的产量增加。这可能是由于蒸腾中的大部分水分消耗于土壤高水分区的蒸发或因相邻灌水沟侧向入渗的影响使土壤水分下渗缓慢, 使水分长时间停留在灌水沟中, 从而增加了蒸发耗水; 对于交替隔沟灌溉, 低蒸腾量并没有影响产量, 这表明控制性交替隔沟灌溉能够减少作物奢侈的蒸腾耗水, 这种现象的产生可能是由于水分胁迫情况下, 在土壤干燥区内产生了控制气孔开度的根源信号^[5~8], 使作物气孔开度在一个较为适宜的范围内从而减少了作物奢侈的蒸腾耗水, 降低了作物的蒸发蒸腾。从表 2 中可以看出, 采用交替隔沟灌水方式, 在同等灌水量水平下, 其产量明显高于常规灌溉, 增产 2185% ~ 3196%。且交替隔沟灌溉灌水量为 $2\ 100\ \text{m}^3\ \bar{o} \text{ hm}^2$ 时的产量高于常规灌溉灌水量为 $3\ 150\ \text{m}^3\ \bar{o} \text{ hm}^2$ 的情况。这表明收获同等产量的玉米, 交替隔沟灌溉比固定隔沟灌溉和常规灌溉需要更少的水, 其节水效率为 3313%。另外, 在同等灌水量水平下, 交替隔沟灌溉因为其低蒸腾和较高产量总水分利用率和灌溉水利用效率均高于固定隔沟灌溉。常规灌溉的总水分利用率和灌溉水利用效率虽然与交替隔沟灌溉相当, 但其产量低于交替隔沟灌溉。因

此, 在田间减少灌水量灌水时, 采用交替隔沟灌水方式是一种经济可行的方法。

[参 考 文 献]

- [1] 康绍忠, 张建华等. 控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路. 干旱地区农业研究, 1997, 2: 1~ 6
- [2] Kang S, Liang Z, Hu W, et al. Water use efficiency of controlled alternate irrigation on root divided maize plants. Agricultural Water Management, 1998, 38: 69~ 76
- [3] 梁宗锁, 康绍忠, 胡 炜等. 控制性分根交替灌溉节水效应. 农业工程学报, 1997, 13(4): 58~ 64
- [4] 梁宗锁. 分根区交替灌溉提高玉米十分利用率的生理机制. 杨凌: [学位论文]. 西北农业大学, 1999
- [5] Mansfield T A. Stomatal Behavior: Chemical control of stomatal movement. Philos. Trans. R. Soc. London Ser. B, 1976, 273: 541~ 550
- [6] Zeevaert J A D, Creechman R A. Metabolism and physiology of abscisic acid. Annu. Rev. Plant Physiol., 1988, 39: 439~ 473
- [7] Zhang J, Schurr U, Davies W J. Control of stomatal behavior by abscisic acid which apparently originates in roots. J. Exp. Bot., 1987, 38: 1174~ 1181
- [8] Zhang J, Davies W J. Increased synthesis of ABA in partially dehydrated root tips and ABA transport roots to leaves. J. Exp. Bot., 1987, 38: 2015~ 2023

Irrigation Water Infiltration in Furrows and Crop Water Use of Alternative Furrow Irrigation

Pan Yinghua

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100)

Kang Shaozhong

(Institute of Agricultural Soil and Water Engineering, Northwestern Agricultural University)

Abstract A new method of irrigation was designed and tested for its water infiltration and crop water use in the field where maize were grown. Results showed that to compare with conventional furrow irrigation (CFI), lateral infiltration of alternative furrow irrigation (AFI) is more obvious. Due to its wet front depth is less than CFI, it can decrease water deep percolation. AFI can not decrease photosynthesis rate but it can decrease evapotranspiration rate and is helpful to increase evapotranspiration efficiency. For the same irrigation water use, total water use efficiency and irrigation water use efficiency were all more than CFI. And under the same irrigation water use, AFI can not decrease maize yield. To gain same yield, AFI need less water than CFI, its water saving efficiency is 33.3%.

Key words: alternative furrow irrigation (AFI); water infiltration; water use