

不同灌溉制度对玉米根系生长及水分利用效率的影响

张岁岐^{1,2}, 周小平¹, 慕自新¹, 山 仑^{1,2}, 刘小芳^{1,2}

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘 要: 为了探讨不同灌溉制度对玉米根系生长和水分利用效率的影响及基因型间差异, 在大型活动防雨棚和棚外田间条件下, 利用一组玉米遗传材料杂交种户单四号、父本 803 和母本天四进行了研究。结果发现玉米杂交种在根系生长、分布和水分利用效率上表现出显著的杂种优势。在充分灌溉条件下, 玉米杂交种在浅层的根长密度大于亲本, 但在水分亏缺条件下, 玉米杂交种根长密度在整个剖面上都显著大于亲本; 同一玉米基因型在不同的灌溉制度下根长密度在土壤剖面的分布也不同, 拔节期不灌溉条件下玉米根系在深层土壤中的分布较充分灌溉条件下大, 保证了玉米对深层土壤水分的充分吸收, 而后期灌水延缓了表层根系生长的衰退, 产生明显的补偿效应; 拔节期干旱而抽雄期和灌浆期灌水显著提高了 3 种基因型玉米的水分利用效率。通过合理灌溉优化玉米根系分布特性以提高玉米吸水能力和水分利用效率, 是节水栽培上的可行途径。

关键词: 作物, 灌溉, 水分, 干旱, 根长密度, 水分亏缺, 水分利用效率, 补偿效应

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.10.001

中图分类号: S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-10-0001-06

张岁岐, 周小平, 慕自新, 等. 不同灌溉制度对玉米根系生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 1-6.

Zhang Suiqi, Zhou Xiaoping, Mu Zixin, et al. Effects of different irrigation patterns on root growth and water use efficiency of maize[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 1-6. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

水资源短缺和由温室效应所带来的全球干化是陆生植物所面临的最大的非生物逆境胁迫。旱地农业的实践表明植物的水分利用具有高度的可塑性, 少量水灌溉既能满足作物代谢需水, 提高植物的抗逆性, 又由于诱导了植物补偿吸水的特性, 使水分利用效率显著提高^[1-3]。山仑等根据长年对干旱半干旱地区植物水分生理学的研究提出了多变低水条件下补偿效应的概念, 并对不同作物如春小麦、马铃薯、大豆和玉米适应干湿交替水分状况的差异作了研究。发现作物不同种产生补偿效应的程度不同^[4-6]。随后其他学者相继研究了无机营养、灌水时期(与作物生育期相联系的干旱胁迫和复水时期)等对补偿效应的影响, 证实补偿效应受植物遗传特性和外界环境的共同调节^[7-9]。虽然如此, 但补偿吸水的调控及其作用机制的研究还很薄弱, 这一问题无疑是今后生物学节水所面临的主要课题^[10]。

根系对水分的吸收是植物生命活动的基础, 根系生长是作物吸水和获得高产的关键, 尤其是在水分不足的

条件下。大量研究表明, 与根系净生物量相比, 根系在土壤剖面的分布, 对根系吸水功能和作物生产力具有更重要的作用, 而这种分布也具有高度的可塑性, 即可调节性^[11-17]。杂种优势是作物育种上提高玉米产量的主要手段^[18], 如何将根系生长的杂种优势与干旱半干旱地区玉米补偿灌水结合起来, 是提高当前旱地玉米产量和水分利用效率的一个新思路。探讨杂交品种与其父、母本之间根系生长及水分利用补偿效应的差异机制, 必将为生产中培育高水分利用品种和通过根系调节作物的水分利用提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

选用黄土高原主栽玉米品种户单 4 号(F1)及其父本 803(♂)、母本天四(♀)为试验材料, 供试材料由西北农林科技大学农学院玉米研究所育种室提供。

1.2 试验设计

于 2007 年 3 月—2007 年 9 月在中国科学院水土保持研究所大型活动防雨棚内和棚外田间进行。干旱池四周有 2 m 深水泥隔离层, 以防不同水分处理之间水的水平方向渗透。小区面积 2 m×3 m, 株行距为 40 cm×50 cm(点播)。水分处理为 4 水平, 充分供水处理(T1): 位于防雨棚外的大田中, 根据降雨情况随时灌水, 保持土面湿润(1 m 土层的土壤含水率保持在田间持水量的 80%±5%), 其他 3 个水分处理位于干旱棚内。水分处理如表 1 所示, “+”表示灌水, 次灌水量为 600 m³/hm²,

收稿日期: 2009-01-22 修订日期: 2009-10-13.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2006AA100202); 国家自然科学基金项目(30571127); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(2006-2008); 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB118604)

作者简介: 张岁岐(1966—), 男, 陕西岐山人, 研究员, 博士生导师, 主要从事植物水分生理生态研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100. Email: sqzhang@ms.iswc.ac.cn

“-”表示不灌水。水分、基因型交互共 12 个处理，每处理 3 重复，随机区组排列，共 36 小区。除水分处理外，棚内棚外土壤条件、养分条件和其他栽培条件完全一致，灌水方式为大田漫灌，用水表控制灌水量。田间管理同高产玉米田间管理。

表 1 试验小区的水分处理

Table 1 Water treatment of experiment field

| 处理编号 | 拔节期 | 抽雄期 | 灌浆期 |
|------|-----|-----|-----|
| T1 | + | + | + |
| T2 | + | - | + |
| T3 | - | + | - |
| T4 | - | + | + |

注：“+”表示灌溉，“-”表示不灌溉。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤含水率

在播前、拔节期、抽雄期、灌浆期以及蜡熟期，用土钻取土，0~100 cm 范围内每 10 cm 取土，100~200 cm 范围内每 20 cm 取土 1 次。用 105℃ 烘干法求土壤含水率。

1.3.2 耗水量的计算

T1 的耗水量=降雨量+灌水量+(播前土壤含水量-播后土壤含水量)；T2、T3、T4 的耗水量=灌水量+(播前土壤含水量-播后土壤含水量)。

1.3.3 根系取样及根长密度

分别在拔节后期和蜡熟期采用土钻法挖掘根系样本，选完全株，分别在株上(距株 0 cm)，距株 3 cm，株旁(1/4 行距，距株 12.5 cm)、株间(1/2 株距，距株 20 cm)、行间(1/2 行距，距株 25 cm) 5 个点取样。用直径 7 cm 的土钻垂直向下钻 100 cm，每 10 cm 深度一个样本，每样本用冲根器冲洗干净后用 CI-400 型根系图像分析系统分析计算根系的根长密度。试验中，各土层根系分布为先分别求出每个取样株各层 5 个取样点根系分布的平均值，其后 3 个重复株各层根系进行平均即可。

1.3.4 产量和水分利用效率

在玉米授粉期，用套袋和人工授粉的方法保证玉米各基因型产量为自交产量。玉米生理成熟时，按单株收获，单穗脱粒，籽粒均脱水至恒质量后称质量。水分利用效率用产量水分利用效率(产量/耗水量)表示。

数据分析用 Office excel 软件和 SAS 软件中的 ANOVA 程序进行显著性比较。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉条件下 3 种基因型玉米根系剖面分布特性的差异

在表征根系生长的诸多参数中，根长密度是人们普遍采用的表征根系分布特性的指标。在拔节后期对不同灌溉条件下 3 个基因型玉米根系剖面分布进行的测定结果表明(图 1a)：在充分灌水条件下，玉米杂交种根长密度在表层(20 cm 以上)显著高于其他两种灌溉条件(图

1d)。在 0~40 cm 范围内，3 种灌溉条件下根长密度的差异显著($P<0.05$)，其大小顺序为 $T1>T2>T3$ (图 1a, b, c)；但在 60 cm 深度以下土层，充分灌溉处理 T1 的根长密度低于 T2 和 T3($P<0.05$)，其大小顺序为 $T3>T2>T1$ (图 1a)。亲本在 3 种灌溉条件下其根长密度的分布特性一致(如图 1b, c)，T1 处理下表层根系显著高于 T2 和 T3($P<0.05$)，在 50 cm 深度以下土层，根长密度在 T1 和 T2 下差异不显著，T3 下根长密度在 50 cm 以下土层显著高于 T1 和 T2 处理($P<0.05$)。说明不同的灌溉条件影响着玉米根系分布特性，在充分灌溉条件下，表层含水量较多，玉米根系在表层分布较多，但在水分不足的情况下，根长密度在深层较大，水分不足促进深层根系发育是玉米根系对环境水条件的适应对策。

3 种灌溉条件下 3 种基因型玉米在根长密度剖面上存在显著差异。在充分灌水条件下(如图 1d)，在 60 cm 深度以上土层范围内，玉米杂交种根长密度显著大于亲本($P<0.05$)，表现出明显的杂种优势。在 70 cm 深度以下土层杂交种玉米与亲本根长密度差异不显著。在 T2 灌溉条件下(如图 1e)，0~90 cm 深度范围内，杂交种根系密度都显著大于亲本($P<0.05$)，父本在 70 cm 以上土层根长密度显著大于母本，在 70 cm 以下土层父母本之间差异不显著。T3 灌溉条件下(如图 1f)，整个剖面上杂交种根长密度都显著大于亲本($P<0.05$)，而父本的根长密度在整个剖面上也大于母本。较大的根长密度有利于杂交种在水分不足的状况下获取尽可能多的水分以供玉米生长需要。

2.2 不同生育时期玉米根长密度分布的变化

对 3 种基因型玉米拔节后期和蜡熟期玉米根长密度在剖面上的分布变化进行了研究，发现两时期根长密度的变化在 3 种基因型玉米之间趋势一致，这里仅就玉米杂交种的研究结果进行讨论。在充分灌溉条件下(如图 2a)，玉米杂交种蜡熟期根长密度在整个剖面上都显著小于拔节后期($P<0.05$)，表现出根系在生育后期的衰退。在 T2 灌溉条件下(如图 2b)，蜡熟期 60 cm 以上土层中玉米根长密度与拔节后期没有显著差异，但在 60 cm 以下的剖面上，蜡熟期根长密度显著低于拔节后期($P<0.05$)，这说明抽雄期水分亏缺加剧了玉米根系的衰退，但灌浆期的灌水产生了补偿效应，促进了根系在表层的补偿生长，使得其根长密度在表层没有显著的衰退。T3 灌溉条件下(如图 2c)，蜡熟期在整个剖面根长密度都显著低于拔节后期($P<0.05$)，这说明灌浆期水分的亏缺加剧了玉米根系的衰退，使得其根长密度显著低于拔节期。在 T4 灌溉条件下(如图 2d)蜡熟期杂交种玉米根长密度在 50 cm 以上土层显著高于拔节后期，而 50 cm 以下土层根长密度显著低于拔节后期($P<0.05$)，这说明深层土壤中根系表现出了一定程度的衰退，但是拔节期水分亏缺后抽雄期和灌浆期的灌溉促进了生育后期根系在表层的发育。

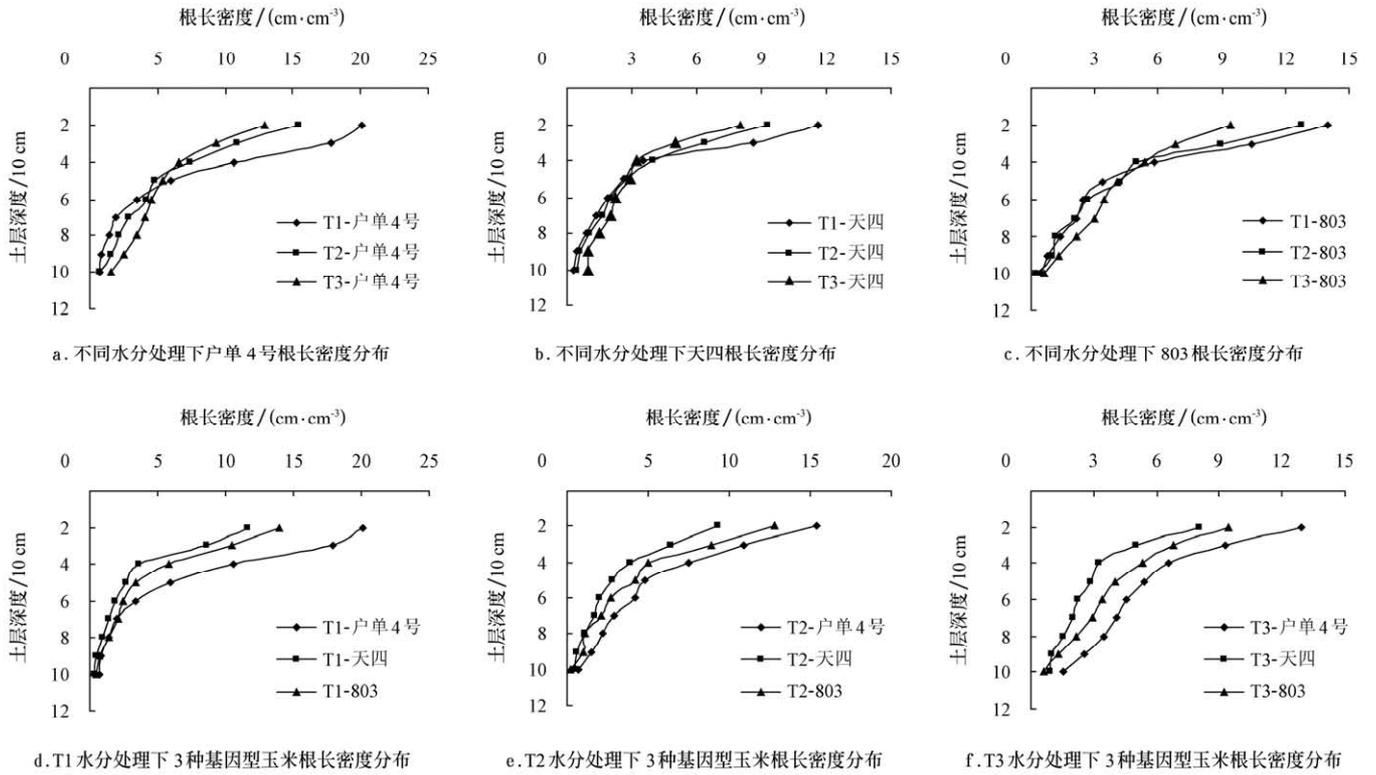


图 1 拔节期玉米根系剖面分布在不同灌溉条件下的差异

Fig.1 Difference of root profile distributions of maize at jointing stage under different irrigation patterns

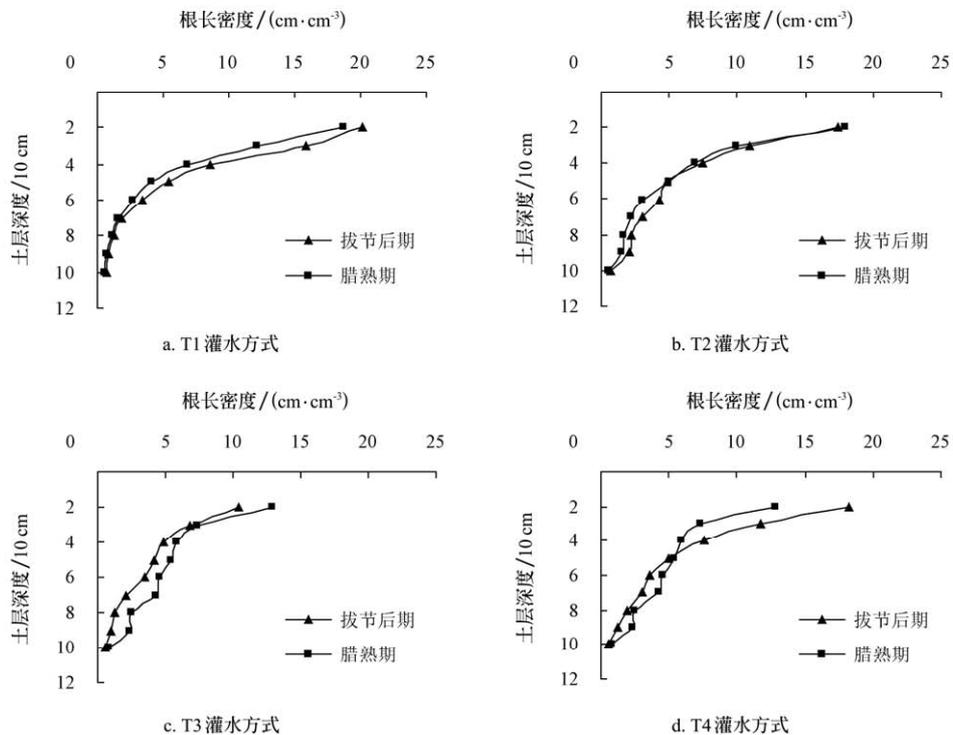


图 2 4 种灌溉条件下杂交种玉米在拔节期和腊熟期的根系分布状况

Fig.2 Profile distributions of root length density of hybrid maize at jointing and dough stage under four irrigation patterns

2.3 3 种基因型玉米在不同灌溉条件下的产量

如图 3 所示，在几种灌溉条件下，玉米杂交种产量都显著大于亲本，表现出明显的杂种优势。3 种基因型玉米在几种灌溉条件下产量大小顺序都是户单 4 号>803>

天四。

不同时期水分亏缺均降低了玉米的产量，但不同时期水分亏缺对玉米产量影响的幅度不同，与充分灌水相比，玉米杂交种在 3 种灌溉条件下的产量下降幅度由小

到大为 T4 (30%) < T2 (37%) < T3 (42%)。T4 处理产量下降幅度较小, 原因可能是拔节期水分亏缺在后期灌溉下同时保证了玉米根系在深层和浅层均有较高的分布, 而其他两处理下, 在玉米生殖生长时期的水分亏缺导致玉米产量的大幅下降。不同灌溉方式下, 两亲本产量变化有相同的趋势。

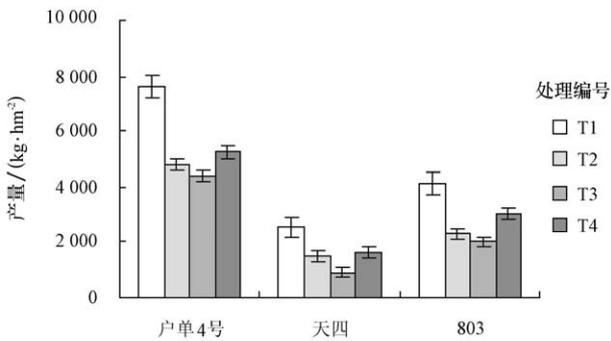


图3 几种灌溉条件下3种基因型玉米的产量变化

Fig.3 Yields of three kinds of genotype maize under different irrigation patterns

2.4 3种基因型玉米在不同灌溉条件下的水分利用效率

对几种灌溉条件下3种基因型玉米水分利用效率进行的研究结果表明(图4): 在4种灌溉条件下, 玉米杂交种水分利用效率都高于亲本, 表现出水分利用效率的杂种优势。

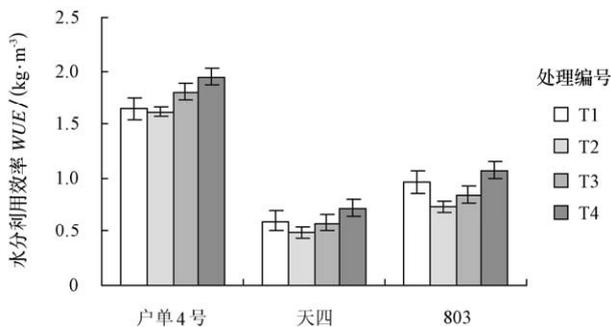


图4 几种灌溉条件下3种基因型玉米的产量水分利用效率

Fig.4 Water use efficiencies of three kinds of genotype maize under different irrigation patterns

拔节期不灌水而后期灌水条件下(T4处理), 3种基因型玉米的水分利用效率均最高, 这是因为T4处理的产量下降幅度小于耗水量的下降幅度。而抽雄期不灌溉处理(T2)的水分利用效率均最低, 因为抽雄期水分亏缺导致玉米产量的下降幅度要大于拔节期水分亏缺处理, 但耗水量的下降幅度与拔节期水分亏缺处理基本一致。杂交种拔节期与灌浆期两时期水分亏缺的(T3)处理下水分利用效率也较充分灌溉处理高, 这是因为两个时期的水分亏缺大大降低了玉米生育期的耗水量, 但这种水分利用效率的提高是以产量的大幅下降为代价的。父本803和母本天四在T4下其水分利用效率高于充分灌溉, 但与杂交种不同的是, T3处理下父母本的水分利用效率较充分灌溉下有所下降。综合产量变化结果可以认

为, 拔节期水分亏缺由于增加了玉米根系深层分布而显著提高了其水分利用效率, 而抽雄期水分亏缺由于加剧了玉米根系的衰退, 明显降低了玉米的产量和水分利用效率。

3 讨论

土壤水分条件影响着植物根系的分布, 形态特征以及吸水能力。当表层土壤水分亏缺时, 根会向深层延伸, 有利于根系发育和深层土壤水分的利用^[19-20]。大田条件下深层根少深层根多有助于稀释根信号作用; 充足的底墒可促进作物形成深根系, 抑制根信号的强烈表达, 并提高籽粒产量和水分利用效率。不同的灌溉制度也会影响根系的发育, 进而影响根系的吸水能力, 限量供水可以增加植物对深层土壤贮水的利用程度。陈晓远和杨培岭等报道, 拔节期复水对小麦根质量、叶质量和穗质量增长产生明显促进作用^[21]。马瑞昆等也报道前期限制供水有利于前期根系发育^[22], 前期控水处理强化了根系吸水能力, 提高了作物对底墒尤其是对1~2 m 深层底墒的利用, 有利于产量形成阶段光合物质生产^[23]。本试验结果发现, 玉米拔节期水分亏缺促进了深层根系的发育, 而后期灌水则延缓了表层根系衰老, 产生了补偿效应, 因此可充分利用不同时期补偿效应的差异实现农业节水。

玉米根系的生长方向决定于基因和环境因素^[11, 19-20]。我们的研究表明杂交种玉米在根系分布上表现出显著的杂种优势。在充分灌溉条件下, 杂交种玉米在表层的根长密度大于亲本, 但在水分亏缺条件下, 杂交种玉米根长密度在整个剖面上都显著大于亲本。这种根系分布上的优势, 决定了杂交种玉米根系吸水能力的优势, 是其高产的重要原因。本研究结果表明, 玉米根系在水分亏缺条件下深层土壤中根长密度较充分灌溉条件下深层土壤中根长密度大。而Nakamoto研究也表明在未灌溉和早期干旱的土壤中根系比充分灌溉和晚期干旱的土壤中深层根系生长多, 土壤水分含量直接影响着根系的生长方向^[24]。水分亏缺产生更深的根系, 其原因可能是与根系向下生长的方向改变有关。Nakamoto提出环境水分状况对根系生长方向的影响是因为环境水分状况直接影响着根尖的生长方向^[24], 这与低水势加强了根系的向地性反应这个研究结果一致^[2-3]。即使在干旱地区, 深层的土壤中仍存在可利用水源, 因此深层土壤中根量不足限制着土壤有效水的充分吸收^[2-3]。杂交种玉米根系在干旱条件下深层土壤中根长密度显著高于亲本, 是其在在水资源不足条件下仍可获得高产的保证。说明同一植物不同品种补偿能力不同。因此, 通过优化玉米根系分布特性来提高玉米在干旱条件下的吸水能力, 是抗旱育种和栽培上可行的途径。

早期水分亏缺显著降低了玉米根系在表层的发育, 但却促进了根系在深层土壤中的发育, 这种发育方式是根系生长与环境相互适应的结果^[19-20]。本研究中, 玉米抽雄期和灌浆期的灌溉, 补偿了拔节期水分亏缺所引起的根系发育受损状况, 减缓根系生长的衰退, 保证了根

系在生殖生长期的吸水能力, 因而显著提高了玉米的产量和水分利用效率。

3 种基因型玉米产量和水分利用效率对拔节期干旱的响应一致, 拔节期不灌水降低了玉米的产量, 水分利用效率却显著高于充分灌溉, 与这种灌水方式促进了深层根系生长和延缓了表层根系衰退有关, 并在大量降低耗水量的情况下使产量降低幅度较小。抽雄期不灌溉条件下玉米的产量和水分利用效率均显著下降, 并且其水分利用效率也低于充分灌水, 与玉米抽雄期对水分亏缺极端敏感有关。拔节期和灌浆期两时期水分亏缺条件大幅降低了玉米的耗水量, 水分利用效率较充分灌水有所增加, 但是这种耗水量的降低却是以产量的大幅下降为代价。

4 结 论

不同灌溉制度明显影响了玉米根系生长和水分利用效率。玉米杂交种在根系生长、分布和水分利用效率上表现出显著的杂种优势。拔节期不灌溉条件下玉米根系在深层土壤中的分布较充分灌溉条件下大, 保证了玉米对深层土壤水分的充分吸收; 而后期灌水延缓了表层根系生长的衰退, 产生明显的补偿效应。拔节期干旱而抽雄期和灌浆期灌水显著提高了 3 种基因型玉米的水分利用效率。这为通过合理灌溉优化玉米根系分布特性以提高玉米水分利用效率提供了科学依据。

[参 考 文 献]

- [1] Chaves M M, Maroco J P, Pereira J S. Understanding plant responses to drought— from genes to the whole plant[J]. *Functional Plant Biology*, 2003, 30(3): 239–264.
- [2] Jackson R B, Sperry J S, Dawson T E. Root water uptake and transport: using physiological processes in global predictions [J]. *Trends in Plant Science*, 2000, 5(11): 482–488.
- [3] Eapen D, Barroso M L, Ponce G, et al. Hydrotropism: root growth responses to water[J]. *Trends in Plant Science*, 2005, 10(1): 44–50.
- [4] 郭贤仕, 山仑. 前期干旱锻炼对谷子水分利用效率的影响 [J]. *作物学报*, 1994, 20(3): 352–356.
Guo Xianshi, Shan Lun. Effect of drought hardening in earlier growing stage on water utilization efficiency of millet[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1994, 20(3): 352–356. (in Chinese with English abstract)
- [5] 苏佩, 山仑. 多变低水环境下玉米子粒产量及水分利用效率的研究[J]. *植物生理学通讯*, 1997, 33(4): 245–249.
Su Pei, Shan Lun. Study on grain yield and WUE of maize under highly varied and low water environment[J]. *Plant Physiology Communications*, 1997, 33(4): 245–249. (in Chinese with English abstract)
- [6] 山仑, 苏佩, 郭礼坤, 等. 不同类型植物对干湿交替环境的反应[J]. *西北植物学报*, 2000, 20(2): 164–170.
Shan Lun, Su Pei, Guo Likun, et al. The response of different crops to drying wetting cycle in field[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20(2): 164–170. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李世清, 田霄鸿, 李生秀. 养分对旱地小麦水分胁迫的生理补偿效应[J]. *西北植物学报*, 2000, 20(1): 22–28.
Li Shiqing, Tian Xiaohong, Li Shengxiu. Physiological compensation effects of nutrient on winter wheat in dryland[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20(1): 22–28. (in Chinese with English abstract)
- [8] 关义新, 戴俊英, 徐世昌, 等. 玉米花期干旱及复水对植株补偿生长及产量的影响[J]. *植物学报*, 1997, 23(6): 740–745.
Guan Yixin, Dai Junying, Xu Shichang, et al. Effects of Soil drought during flowering and rewatering on plant compensative growth and yield of maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23 (6): 740–745. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李凤英, 黄占斌. 夏玉米不同生育阶段干湿变化的补偿效应研究[J]. *生态农业学报*, 2001, 9(3): 61–63.
Li Fengying, Huang Zhanbin. A study on compensatory effect of corn at different growth stages to water deficit change[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(3): 61–63. (in Chinese with English abstract)
- [10] 胡田田, 康绍忠. 植物抗旱性中的补偿效应及其在农业节水中的应用[J]. *生态学报*, 2005, 25(4): 885–891.
Hu Tiantian, Kang Shaozhong. The compensatory effect in drought resistance of plants and its application in water-saving agriculture[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 885–891. (in Chinese with English abstract)
- [11] Liang B M, Sharp R E, and Baskin T I. Regulation of growth anisotropy in well-watered and water-stressed maize roots (I. Spatial distribution of longitudinal, radial, and tangential expansion rates)[J]. *Plant Physiology*, 1997, 115(1): 101–111.
- [12] Asseng S, Ritchie J T, Smucker A J M and Robertson M J. Root growth and water uptake during water deficit and recovering in wheat[J]. *Plant and Soil*, 1998, 201(2): 265–273.
- [13] Xue Q, Zhu Z, Musick J T, et al. Root growth and water uptake in winter wheat under deficit irrigation[J]. *Plant and Soil*, 2003, 257(1): 151–161.
- [14] 刘庚山, 郭安红, 任三学, 等. 人工控制有限供水对冬小麦根系生长及土壤水分利用的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(11): 2342–2352.
Liu Gengshan, Guo Anhong, Ren Sanxue, et al. The effect of limited water supply on root growth and soil water use of winter wheat[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2342–2352. (in Chinese with English abstract)
- [15] 慕自新, 张岁岐, 郝文芳, 等. 玉米根系形态性状和空间分布对水分利用效率的调控[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 2895–2900.
Mu Zixin, Zhang Suiqi, Hao Wenfang, et al. The effect of root morphological traits and spatial distribution on WUE in maize[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2895–2900. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王淑芬, 张喜英, 裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 27–32.

- Wang Shufen, Zhang Xiying, Pei Dong. Impacts of different water supplied conditions on root distribution, yield and water utilization efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(2): 27—32. (in Chinese with English abstract)
- [17] Lynch J. Root architecture and plant productivity[J]. Plant Physiology, 1995, 109(1): 7—13.
- [18] Hochholdinger F, Hoecker N. Towards the molecular basis of heterosis[J]. Trends in Plant Science, 2007, 12(9): 427—432.
- [19] Potters G, Pasternak T P, Guisez Y, et al. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble [J]. Trends in Plant Science, 2007, 12(3): 98—105.
- [20] Pasternak T, Rudas V, Potters G, et al. Morphogenic effects of abiotic stress: reorientation of growth in Arabidopsis thaliana seedlings[J]. Environmental and Experimental Botany, 2005, 53(3): 299—314.
- [21] 陈晓远, 罗远培. 土壤水分变动对冬小麦干物质分配及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(1): 96—103. Chen Xiaoyuan, Luo Yuanpei. Effect of fluctuated soil water condition on dry matter allocation and grain yield in winter wheat[J]. Journal of China Agricultural University, 2001, 6(1): 96—103. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨培岭, 刘洪禄, 任树梅. 节水条件下大田冬小麦的根冠关系[J]. 中国农业大学学报, 1997, 2(6): 57—62. Yang Peiling, Liu Honglu, Ren Shumei. Root and shoot relations of winter wheat under different irrigation conditions[J]. Journal of China Agricultural University, 1997, 2(6): 57—62. (in Chinese with English abstract)
- [23] 马瑞昆, 贾秀领, 蹇家利, 等. 前期控水条件下冬小麦的根系和群体光合作用特点[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(2): 88—91. Ma Ruikun, Jia Xiuling, Jian Jiali, et al. Characteristics of root and canopy photosynthesis of early water saving in winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2001, 21(2): 88—91. (in Chinese with English abstract)
- [24] Nakamoto T. Effect of soil water content on the gravitropic behavior of nodal roots in maize[J]. Plant and Soil, 1993, 152(2): 261—267.

Effects of different irrigation patterns on root growth and water use efficiency of maize

Zhang Suiqi^{1,2}, Zhou Xiaoping¹, Mu Zixin¹, Shan Lun^{1,2}, Liu Xiaofang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming of the Loess Plateau, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to investigate the effects of different irrigation patterns on root growth and water use efficiency of maize and the differences among genotypes, the field and rain-out shelter experiment with different genotypes of maize (hybrid Hudan 4 and its parents 803 and Tian 4) were carried out. The result showed that hybrid maize Hudan 4 existed marked heterosis in root growth, root profile distribution and water use efficiency. The root length density of hybrid maize Hudan 4 was higher than that of its parents at shallow soil layer under full irrigation condition, but the root length density of Hudan 4 was markedly higher than that of its parents at whole soil profile under water stress conditions. Meanwhile, the root system distribution of same maize genotypes were different under different irrigation patterns. Compared with fully irrigation, no irrigation at jointing stage resulted in the more root distribution at deeper soil layer, which ensured the uptake and use of deeper soil layer water for maize. Root growth produced obvious compensation effect irrigated at later stage (head and filling stage), decline rate of root growth was alleviated at shallow soil layer. Water use efficiency of maize was markedly increased with no irrigation at jointing stage and rewatering at head and filling stage. Therefore, optimizing root profile distribution by rational irrigation is reliable approaches to raise water use efficiency of maize under drought conditions.

Key words: crops, irrigation, water, drought, root length density, water stress, water use efficiency, compensation effect