植物营养与肥料学报 2005,11(4):442－448
Plant Nutrition and Fertilizer Science

不同灌溉模式下水分养分的运移及其利用

谭军利，王林权*，李生秀
（西北农林科技大学资环学院，陕西杨凌 712100）

摘要：以玉米为试验材料通过人工控制水分的微区试验，比较了水肥异区交替灌溉与传统均匀灌溉条件下，水分与养分在200cm剖面上的动态迁移规律，并分析了不同灌水模式下的灌溉效率和肥料利用效率。结果表明，在低灌水量(450 m^3/hm^2)水平下水肥异区交替灌溉，施肥区和灌水区之间存在水势梯度差异，NO_3-N含量也有差异；灌溉效率和肥料利用效率均高于均匀灌溉。在高灌水量(900 m^3/hm^2)水平下，水肥异区交替灌水与常规均匀灌水差异不显著，但养分离子发生了强烈的淋洗。收获后，交替灌溉的 NO_3-N 残留量比传统灌溉要高，而水分残留量则相反。研究结果发现，交替灌溉在450m^3/hm^2 时的产量与均匀灌溉在 900 m^3/hm^2 时的产量相差并不大，即交替灌溉可节水一半。秸秆覆盖能影响 0—60 cm 土壤水分运动，可减少土壤水分蒸发，但对玉米产量影响不大。

关键词：灌溉模式；水分养分运移；灌溉效率；肥料利用效率
中图分类号：S275　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-505X(2005)04-0442-07

Movement and utilization of water and nutrient under different irrigation patterns

TAN Jun-li , WANG Lin-quan* , LI Sheng-xiu
(*College of Resour. and Envir., Northwest Sci-tech Univ. of Agric and For., Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: We conducted an experiment to determine the effect of different patterns of irrigation and fertilization on: (i) the distribution of nitrate and water in the soil profile and (ii) irrigation efficiency and the recovery of applied fertilizer. Micro-field trials were conducted using rain shelters to control water input. Maize (*Zea Mays* L. cultivar: Hudan 4) was used as a test crop. The experiment consisted of two irrigation methods. One is alternate furrow irrigation method in which irrigation water was applied to one row and fertilizer was applied to the adjoining row at the same time. The other one is traditional method. In this method, water and fertilizer were both applied to the same row. Two water rates (450 m^3/ha and 900 m^3/ha) were set up and soil water and nitrate contents from 0—200 cm in the soil profile were determined in this experiment. Results indicated that there was a water potential difference between rows in the alternate furrow irrigation method when the rate of irrigation water was 450 m^3/ha. So do the nitrate content. However, there was no significant difference on the water potential between rows when 900 m^3/ha water was used. The low concentration of nitrate from 0—180 cm in the 900 m^3/ha treatment indicated that nitrate was leached out. After maize harvest, the amount of available nitrate in the soil in the alternate furrow irrigation treatment was higher than that in the traditional irrigation treatment. However, the soil water content was less in the alternate furrow irrigation treatment compared to the traditional treatment. Grain yield in the alternate furrow irrigation treatment with 450 m^3/ha of irrigation water was nearly equal to that of the traditional irrigation method under 900 m^3/ha. This indicates that half irrigation water could be saved when the alternate furrow irrigation treatment was used without any yield reduction. Irrigation efficiency and the recovery

收稿日期：2004-07-05　　**修改稿收到日期**：2004-11-09
基金项目：国家自然科学基金重点项目“西北旱地优质高产高效栽培的生理生态研究”(30230230)资助。
作者简介：谭军利(1978—)，男，湖南茶陵人，硕士研究生，主要从事作物营养与调控研究。* 通讯作者
本文的英文摘要及文中的英文部分得到我校外籍教师 Jiff Gale 博士的热心指导和帮助；西北农林科技大学的张富仓研究员、李志军老师为本试验提供了场地和诸多便利条件，在此表示诚挚的感谢！

of fertilizer in the alternate furrow irrigation method were higher than that of traditional model when the amount of irrigation water was 450 m^3/ha. Evaporation was significantly decreased when the soil was mulched with wheat straw, moreover, the use of straw mulch is also beneficial to nutrient uptake. Nevertheless maize yield was not affected significantly by the mulch treatment. In conclusion, the alternate furrow irrigation method combined with the application of irrigation water at the rate of 450 m^3/ha is appropriate for semi-humid areas. Straw mulch is of great advantage of water saving.

Key words: irrigation pattern; dynamics of water and nutrient; efficiency of irrigation water; fertilizer utilization efficiency

农业用水量占全国用水量的73.3%[1]。随着工业化,城镇化进程的进一步加快,水资源日益紧缺,加之我国水土资源配合不协调,淮河以北地区耕地约占全国的60%以上,而水资源总量却不到全国的20%[2],农业用水的相对量和绝对数量必然会减少。土地贫瘠和干旱胁迫成为旱农地区发展的瓶颈。为了提高旱农地区水分利用率和生产力,许多科学家相继提出了有限灌溉,调亏灌溉,非充分灌溉等概念和方法。康绍忠等[3-5]结合前人研究提出了控制性交替灌溉的节水技术。其原理是:干燥区域的根系能够感知土壤干旱产生输出一种根源信号,当这种根信号传递到地上部分可减少气孔开度,使蒸腾大幅度下降而光合基本不受影响[6]。该项技术能在降低灌水量的条件下产量下降很少[4,7-12];同时还对这种灌溉条件下的根系分布[8]、水分入渗特性[10,13]、光合特性[14]等进行了研究。

在干旱区有限补充灌溉能显著提高肥料利用效率,水肥之间存在以肥调水,以水促肥的交互效应[11,15-16]。但是,也存在施肥不合理的现象,如关中地区的"一炮轰"的施肥方法,即播种时一次施足底肥不再追肥。不合理施肥导致肥料利用率下降,造成资源浪费;同时又可能引起生态环境恶化。因此,如何改变施肥技术来适应新的灌溉技术,就成为干旱地区农业研究的当务之急。有研究表明[17-19],施肥位置会影响根系的吸收,叶片的光合,同化物分配和水分利用。Skinner[20]等的玉米试验表明,隔沟灌溉并结合肥料施于不灌水沟有利于减少肥料淋溶的可能。王林权等[12-13]对交替隔沟灌溉下的施肥方法进行了研究认为,水肥异区交替灌溉是一种好的组合方式;同时也模拟了水肥异区交替灌溉条件下水分与速效氮的迁移规律。何华等[19]的研究说明,限域供应 NO_3^- 能够刺激侧根萌发伸长和增加根系密度。但是,对于玉米生长期间交替灌溉条件下水分养分的动态运动研究甚少。本试验的目的是在排除降雨因素干扰的条件下,严格控制灌水量,研究水肥异区交替灌水施肥的产量效应和水肥在土壤中的运移规律,为这一新的施肥灌溉模式提供理论依据;揭示不同灌溉施肥条件下水分养分的运移规律及其环境效应。

1 材料与方法

1.1 试验方法

试验在西北农林科技大学灌溉站渗漏池中进行,有可移动的遮雨大棚防止雨水落入试验区。小区面积为1.5m^2,深2.0m,四周围以15cm厚的水泥墙,防止各小区之间水肥互渗,底部用水泥封死防止地下水对试验的影响,并埋20cm的沙子。供试土壤为红油土,其有机质含量为8.37g/kg,全N 0.534 g/kg,碱解N 33.2mg/kg,速效P 5.21mg/kg,速效K 107.65 mg/kg,pH 7.82。供试作物为玉米,品种为户丹4号。

微区试验设:1)休闲的耕作方式,只施基肥灌底水,同时裂区为覆秸秆和不覆秸秆(CK1);2)种玉米,其处理同CK1(CK2);3)低灌水量时的传统均匀灌溉施肥处理,施底肥灌底水,并在大喇叭口期和抽雄期灌水施肥,灌水量为每次450m^3/hm^2(LTI);4)低灌水量时水肥异区交替灌水处理,其他处理同LTI(LAI);5)高灌水量时的传统均匀灌溉施肥处理,施底肥灌底水,并在大喇叭口期和抽雄期灌水施肥,灌水量为每次900m^3/hm^2(HTI);6)高灌水量时水肥异区交替灌水的处理,其他处理同HTI(HAI)。每个处理重复2次,共12个小区。各处理的具体实施方法:均匀施肥灌水,为每一沟都施肥灌水;水肥异区交替灌水为每一次灌水时施肥与灌水在不同的沟中进行,大喇叭口期的灌水区在抽雄期变成施肥区,而施肥区则变成灌水区。

玉米于2003年6月17日播种,每小区播2行,行距60cm,株距25cm。播种前整地,每小区灌底水0.3 m^3,施肥不设水平。磷肥为过磷酸钙,作基肥一次施入,折合 P_2O_5 45 kg/ hm^2;氮肥为尿素,折合N 180 kg/hm^2,1/2作基肥,剩下1/2分2次在孕穗期和开花期追施。7月2日间苗,每穴留苗2株。每小

区共24株苗。10月1日收获。

1.2 测定项目及方法

灌水分别在大喇叭口期(7月30日)和抽雄期(8月30日)。每次灌水后7d测定土壤剖面各层次土壤水分、NO_3^- - N、NH_4^+ - N的含量。收获后,测定土壤水分、NO_3^- - N、NH_4^+ - N的残留。采样深度1.8m,每20cm土层取一个样;并刈割玉米植株测定生物量及产量并将玉米植株烘干粉碎测定植株总体含氮量。

土壤含水量,烘干法;速效氮含量用1mol/L KCl浸提振荡1h后,NO_3^- - N采用紫外分光光度校正因素法,NH_4^+ - N用靛酚蓝比色法测定;植株含氮量用H_2SO_4 - H_2O_2消煮,靛酚蓝比色法测定。

试验数据用Excel 2000和SAS V8.0处理。

2 结果与分析

2.1 不同施肥灌水方式下土壤剖面中土壤水分的分布

2.1.1 低灌水量(450m³/hm²)条件下的土壤水分分布 大喇叭口期测定(图1A)看出,LTI的各个土层土壤含水量比交替灌溉施肥区要高,LAw(为水肥异区交替灌水低水量的灌水区)与LTI(传统灌溉方式)在0—40cm层次上土壤水分含量相同,而在60cm层次以下LTI的土壤含水量比LAw要高。60cm以上施肥区明显低于灌水区,尤其是0—20cm差异较大;60cm以下土层中水分差异不显著。抽雄期测定(图1B)看出,LAw与LAf(水肥异区交替灌水低水量的施肥区)在0—60cm的水分变化趋势一致,且土壤含水量差异较小,而在60cm以下LAw的土壤含水量比LAf要高。交替灌水后,灌水区与施肥区在0—60cm土体中土壤水分差异变小。均匀灌溉在整个剖面上土壤含水量都比交替灌溉要高。

2.1.2 高灌水量(900m³/hm²)条件下的土壤水分分布 大喇叭口期测定(图1C)看出,交替灌溉的HAw(水肥异区交替灌水高水量的灌水区)和HAf(水肥异区交替灌水高水量的施肥区)在0—60cm土体上土壤水分含量有较大差异,HAw与HTI(传统灌溉方式)则在该层次上土壤水分含量接近。而HTI在60cm以下土壤水分含量远高于交替灌溉的两个区域。抽雄期测定(图1D)看出,HAw与HAf的水分分布曲线基本吻合,没有大的差异。在900m³/hm²条件下,交替灌溉根系周围没有水势梯度差异。HTI的下层含水量明显大于HAw和HAf,其垂直下渗运动很强。

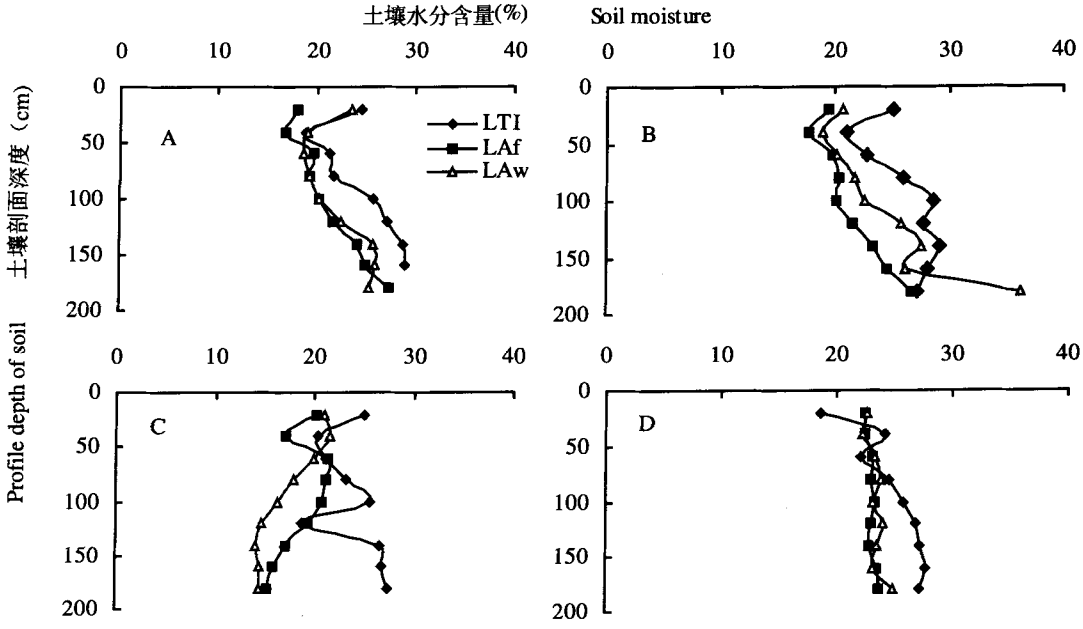

图1 不同采样时期土壤水分分布图

Fig.1 Soil water contents at different sampling times

(A、B分别为在大喇叭口期和抽雄期测定,灌水量450 m³/hm²;C、D分别为在大喇叭口期和抽雄期测定,灌水量900 m³/hm²,下同。

A,B determined at the booting and flowering stages, respectively and the amount of irrigation water was 450m³/hm²;

C,D determined at the booting and flowering stages and the amount of irrigation water was 900m³/hm², same as follows)

比较低、高灌水量土壤水运动可以看到,第一次水肥异区交替灌溉时,无论是低灌水量还是高灌水量条件下,施肥区与灌水区的土壤水分含量都存在差异。交换施肥区和灌水区后,低灌水量的处理的灌水区与施肥区仍然存在差异,即灌水区高于施肥区;而高灌水量处理则基本一致。说明在高灌水量的条件下,由于交替灌溉的侧渗明显,因此交替灌溉无意义。

2.2 不同施肥灌水方式下土壤剖面中 NO_3^- - N 的分布

2.2.1 低灌水量(450m³/hm²)条件下的土壤 NO_3^- - N分布　大喇叭口期测定(图 2A)表明,LAf 的 NO_3^- - N含量在 0—20cm 层次上明显高于 LTI 和 LAw;LAw 在 160cm 处有显著累积,说明在低灌水量时 NO_3^- - N 有淋溶的可能。抽雄期测定(图 2B)表明,LTI 的土壤 NO_3^- - N 含量比大喇叭口期有明显的增加。交换施肥区和灌水区后,LAw 和 LAf 在 40cm 以上 NO_3^- - N 分布有差异,40cm 以下差异较小,LAw 在 180cm 的土壤中 NO_3^- - N 含量较高,可能是上层 NO_3^- - N 淋溶所致。

2.2.2 高灌水量(900m³/hm²)条件下的土壤 NO_3^- - N 分布　在大喇叭口期,HTI 和 HAw 在整个剖面上 NO_3^- - N 分布很相似,HAf 的 NO_3^- - N 量主要集中在 0—80cm 层次上,且显著高于 HAw 和 HTI。说明在高灌水量时,常规施肥灌水模式的土壤氮素淋失比较严重(图 2C)。在抽雄期(图 2D),交换施肥灌水位置后,HAw 在整个剖面层次上 NO_3^- - N 含量大幅度减少,是玉米吸收和 NO_3^- - N 淋溶所致。HAf 整个剖面上 NO_3^- - N 含量都很高,NO_3^- - N 分布呈双曲线形。HTI 的土层上 NO_3^- - N 含量从上往下依次递减,可能有部分已经从 180cm 土层流失。

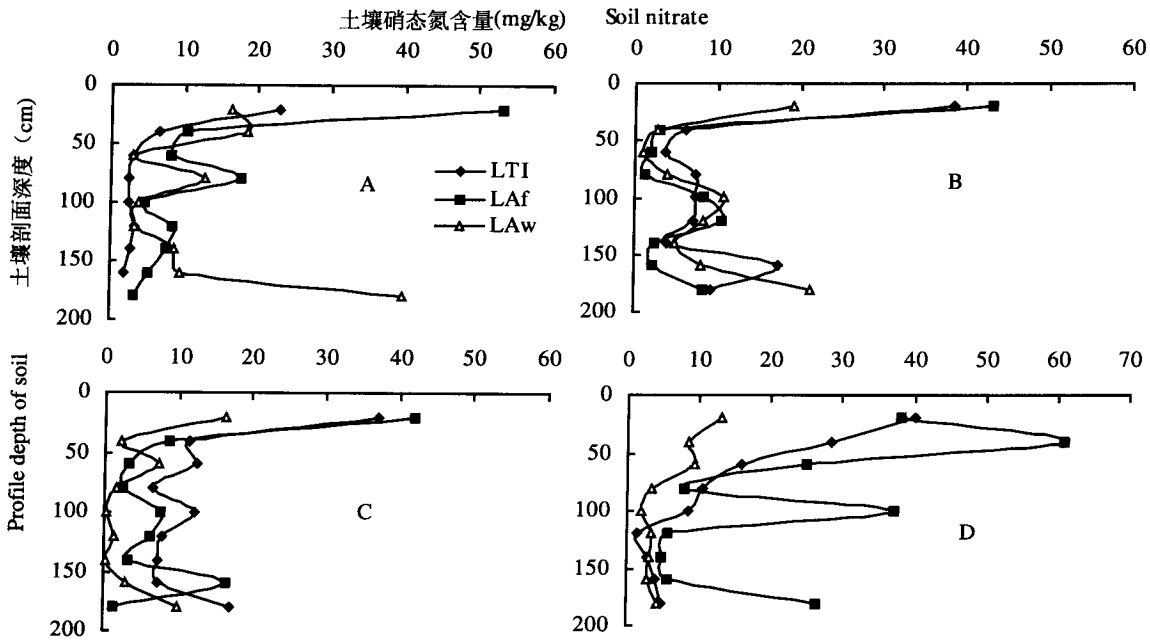

图 2　不同采样时期土壤 NO_3^- - N 含量

Fig.2　Nitrate contents in soil at different sampling times

总之,高灌水量条件下无论是交替灌溉还是均匀灌溉,由于有充裕的水能够加快 NO_3^- - N 从浓度高施肥区向浓度低的地方扩散和运移,NO_3^- - N 淋失的可能性大幅度增加。而在低灌水量的条件下,NO_3^- - N 的运移有限,淋失的可能性较小。如 LAf 值在 0—20cm 的土层上运动;水肥异区交替灌溉的处理施肥区 NO_3^- - N 氮含量明显比灌水区高。说明在低灌水量的条件下,水肥异区交替灌溉可以减少淋溶,有利于作物的吸收。

因为 NH_4^+ - N 易为土壤胶体所吸附,不易随水分的运动而移动,在剖面上分布差异不大,故此没有分析 NH_4^+ - N 的动态分布。

2.3 收获后土壤水分养分的残留

2.3.1 CK1 与 CK2 的水分养分残留　从图 3 可知,

无论种玉米与否,覆盖秸秆对0—60cm层次上土壤水分含量有显著的影响,它能增加土壤水分含量。无麦草覆盖时,0—60cm土体中覆盖比不覆盖增加储水量10.88mm;种玉米时增加储水量24.38mm。覆盖处理相当于减少了蒸发面积,与交替灌溉时减少湿润面积有异曲同工之处。因此减少湿润面积可以减少地面蒸发。不覆盖秸秆土壤温度高、水分蒸发快,NO_3^- - N随水分的蒸发主要向表层运动。种玉米时土壤NO_3^- - N为植物根系吸收,其含量明显低于休闲处理。

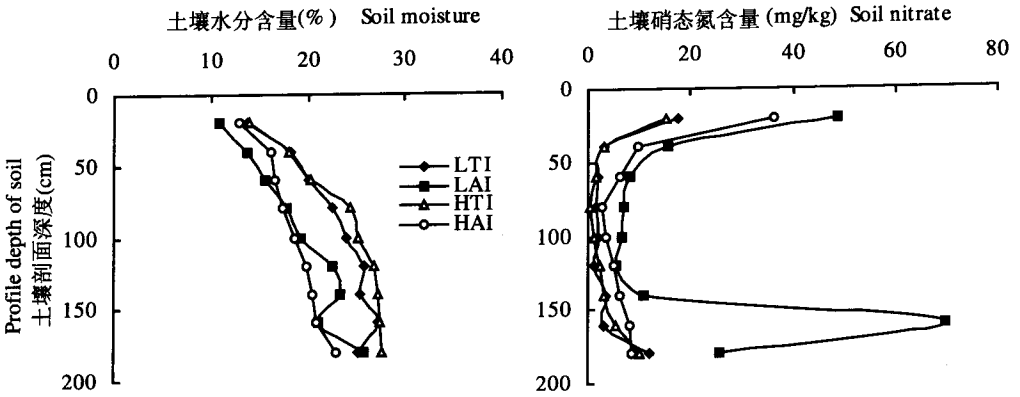

图3 不同处理收获后水分养分残留

Fig.3 Soil water content and soil nitrate content after harvest in different treatments

2.3.2 交替灌溉与均匀灌溉水分养分的残留 无论灌水量是900m³/hm²还是450m³/hm²,均匀灌溉的水分残留量均比交替灌溉要高;而均匀灌溉下土壤NO_3^- - N的残留量均比交替灌溉少(图4)。交替灌溉在450m³/hm²时NO_3^- - N的残留量比900m³/hm²条件下要高,可能是高灌水量时NO_3^- - N淋洗严重,NO_3^- - N从渗漏池中随水流失。

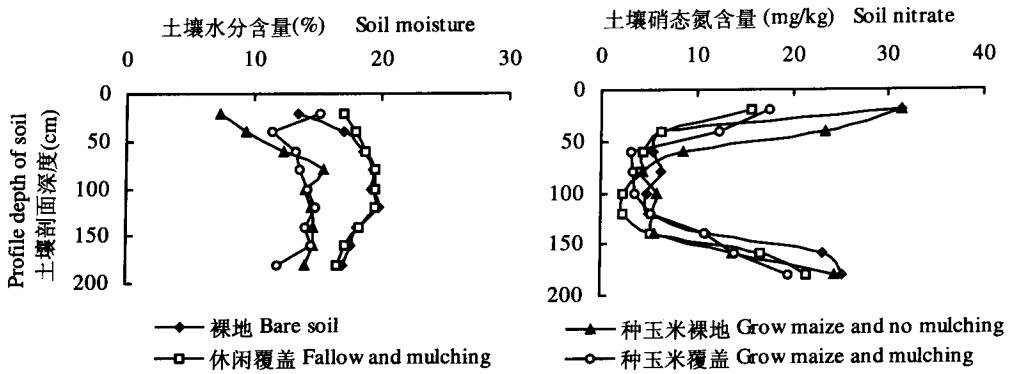

图4 不灌水(CK1、CK2)处理收获后水分和养分残留量

Fig. 4 Soil water and soil nitrate contents after harvest in without irrigation (CK1, CK2) treatments

2.4 灌溉水和肥料利用效率

2.4.1 经济产量及生物量 在900 m³/hm²灌水水平下,交替灌溉的子粒产量略高于常规灌溉,增产14%左右。在低灌水(450 m³/hm²)时,交替灌溉的产量明显高于常规灌溉,增产56%(图5)。LAI与HTI的子粒产量基本相当,LAI的生物学产量甚至高于HTI,说明交替灌溉在节水一半的条件下产量基本没减少。可见灌溉方式对产量有较大的影响。

2.4.2 灌溉利用效率和肥料利用率 灌溉利用效率(WUE)即灌溉增产量除以灌水量,以不灌水的CK2的产量为空白,灌溉小区产量减去空白产量即为增产量,再除以各自的灌水量。图6看出,LAI灌溉效率最高,它与同灌水量的均匀灌溉要高出2倍,比高水量的均匀灌溉的灌溉效率提高了82%。相同灌水量下,交替灌溉比均匀灌溉的灌溉效率要高。可见交替灌溉能提高灌溉效率,尤其在中低灌水量条件下更为显著。

肥料利用效率(FRE)可用下式计算:

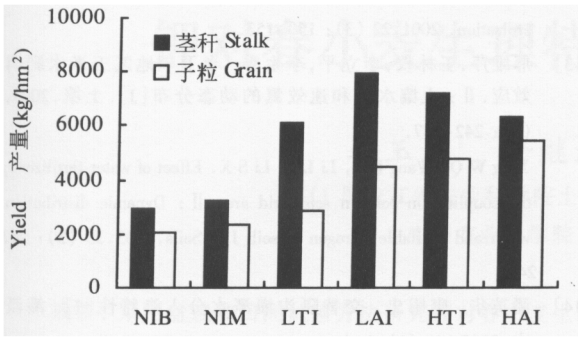

图5　不同处理的玉米子粒和茎秆产量

Fig.5　Grain and stalk yield of maize in different treatments

(NIB—不灌水不覆盖 No irrigation and no straw mulch; NIM—不灌水但覆盖秸秆 No irrigation but straw mulch; LTI, HTI—低,高水量均匀灌溉 Traditional irrigation under low and high amounts of irrigation water; LAI, HAI—低,高水量交替灌溉 Alternate furrow irrigation with low and high amounts of irrigation water; 下同 Same as follows.)

$$R_N = (U1 - U0)/(WC) \times 100\%$$

式中 U1,U0 分别为施肥区与不施肥区作物吸收的养分含量(kg/hm²); W 为肥料施用量(kg/hm²),C 为肥料养分含量。结果(图 6)看出,无论是中灌水量还是高灌水量,交替灌溉比均匀灌溉能提高肥料利用率。中灌水量时,交替灌溉比均匀灌溉提高肥料利用率近 2 倍; 高灌水量时,提高了 26%。这与一些试验[17,20]认为,增加灌水量能提高肥料利用率的结论一致。

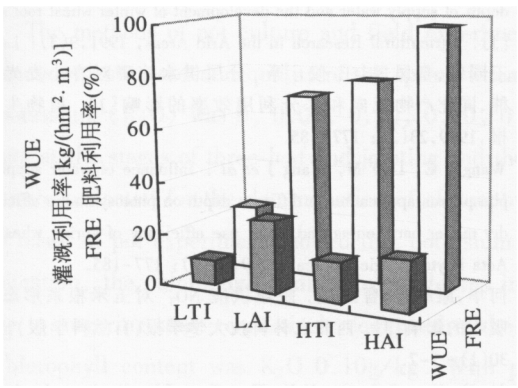

图6　不同处理的灌溉效率(WUE)和肥料利用率(FRE)

Fig. 6　The efficiencies of irrigation water(WUE) and fertilizer recovery (FRE) in different treatments

3　讨论

1)传统的均匀灌溉下水分垂直运动强烈[15],水分残留量要比交替灌溉高,而养分残留量少。在 450m³/hm² 灌水水平下交替灌溉,施肥区与灌水区在 0—40cm 的土层有水势梯度差异,从而使根系的不同部位得到干旱锻炼,提高根系活力和传导力[12]。施肥区在 0—60cm 层次上 NO_3^- - N 含量很高,有利于植物根系的吸收,这与邢维芹等[12]的研究结果一致。由于灌水面积减小了一半,在灌水区水量达到 900m³/hm² 时,会在交换施肥区与灌水区时造成一定的淋溶,这从图 2A、B 中可得到证实。在灌水区,180cm 土层处,硝态氮含量大幅度上升。因此,交替灌溉时,灌水量应控制在适量范围内。

在 900m³/hm² 条件下,施肥区与灌水区的土壤含水量基本接近一致,侧渗作用已经消除了两个区域的水势梯度差异。NO_3^- - N 的含量的峰值出现在 40cm 处,施肥区的养分含量明显高于灌水区,同时有较大的淋溶。交换灌水区与施肥区后,原来施肥区变成了灌水区后发生强烈的淋洗作用。在整个 200cm 土壤剖面上,不论是常规灌溉还是交替灌溉的灌水区,硝态氮含量都很低(图 2C、D),说明氮素可能已经淋出整个系统。

2)水肥异区交替灌溉无论在 450m³/hm² 灌水量还是在 900m³/hm² 灌水量时,产量效应、灌溉效率、肥料利用率都比同灌水量均匀灌溉时高。灌水量过大,根系两侧没有水势梯度差异,起不到给予干旱胁迫产生根源信号调控气孔开度的作用,反而因为灌水强度过大造成肥料的淋溶,污染地下水。因此有必要制定在这种灌溉条件下的灌溉定额,为交替隔沟灌溉的推广提供依据。由于本试验没有设立肥料水平,对水肥耦合的研究是不全面的,需进一步研究。

3)本试验通过裂区试验,比较覆盖与不覆盖秸秆处理条件下水分养分的运动规律。覆盖可以影响 0—60cm 土层水分的分布,增加土体储水量。不覆盖的处理 0—60cm 土壤含水量明显低于覆盖的处理,而 NO_3^- - N 集中于表层,说明裸土条件下蒸发强烈,NO_3^- - N 随水上移而在表层积累。在本试验条件下,麦草覆盖对玉米产量的影响不大。

参 考 文 献:

[1]　陶毓汾,王立祥,韩仕峰. 中国北方旱农地区水分生产潜力及开发[M]. 北京: 气象出版社,1993. 1-5.
Tao Y F, Wang L X, Han S F. The potential of water production and development in arid-agriculture area of north China[M]. Beijing: Meteorology Press, 1993. 1-5.

[2]　水利部科技司,农水司,科技推广中心. 节水灌溉技术[M]. 北京: 中央广播电视大学出版社,1999. 101-103.

Sci-Tech Dept and Agric Water of Water Ministry, Science Popul. Center. Technology of saving water irrigation [M]. Beijing: China Central Radio and TV Univ. Press, 1999. 101-103.

[3] 康绍忠,张建华,梁宗锁,等. 控制性交替灌溉— 一种新的农田节水调控思路[J]. 干旱地区农业研究,1997,15(1): 1-5.
Kang S Z, Zhang J H, Liang Z S *et al*. Controlled alternative irrigation - A new idea of saving water in agriculture field [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1997,15(1): 1-5.

[4] Baker J M, Van Baver C H M. Water transfer through cotton plants connecting soil regions of differing water potential[J]. Agron. J., 1988, 80: 993-997.

[5] Benjamin J G, Porter L K, Duke H R, Ahuja L R. Corn growth and nitrogen uptake with furrow irrigation and fertilizer bands[J]. Agron. J., 1997,89: 609-612.

[6] 张建华,贾文锁,康绍忠. 根系分区灌溉和水分利用效率[J]. 西北植物学报,2001,21(2): 191-197.
Zhang J H, Jia W S, Kang S Z. Partial rootzone irrigation: Its physiological consequences and impact on water use efficiency [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2001,21(2): 191-197.

[7] 梁宗锁,康绍忠,胡炜,等. 控制性交替灌溉的节水效应[J]. 农业工程学报,1997,13 (4): 58-63.
Liang Z S, Kang S Z, Hu W *et al*. Effect of controlled Roots-Divided Alternative Irrigation on water use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13 (4): 58-63

[8] 梁宗锁,康绍忠,石培泽,等. 隔沟交替灌溉对玉米根系分布和产量的影响及其节水效益[J]. 中国农业科学,2000,33 (6): 26-32.
Liang Z S, Kang S Z, Shi P Z *et al*. Effect of alternate furrow irrigation on maize production, root density and water-saving benefit [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000,33(6): 26-32.

[9] 梁宗锁,康绍忠,李新有. 有限供水对夏玉米产量及其水分利用率的影响[J]. 西北植物学报,1995,15(1): 26-31.
Liang Z S, Kang S Z, Li X Y. The effect of limited water supply on the yield and water use efficiency of summer corn [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 1995,15(1): 26-31.

[10] 康绍忠, 史文娟,胡笑涛,梁银丽. 调亏灌溉对于玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,1998,14(4): 82-87.
Kang S Z, Shi W J, Hu X T, Liang Y L. Effects of regulated deficit irrigation on physiological indices and water use efficiency of maize [J]. Transactions of the CSAE, 1998,14 (4): 82-87.

[11] 宋耀选,肖洪浪,冯金朝. 土壤水肥交互作用与玉米的响应[J]. 中国生态农业学报,2001,9(1): 23-24.
Song Y X, Xiao H L, Feng J C. Corn response to interaction between soil moisture and fertilizer [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2001,9(1): 23-24.

[12] 邢维芹,王林权,李生秀. 半干旱地区夏玉米的水肥空耦合效应[J].农业现代化研究,2001,22(3): 150-153.
Xing W Q, Wang L Q, Li S X. Spatial coupling effect of water and fertilizer on corn in semi-arid area[J]. Research of Agricultural Modernization, 2001,22 (3): 150-153.

[13] 邢维芹,王林权,李立平,李生秀. 半干旱地区玉米水肥耦合效应.Ⅱ: 土壤水分和速效氮的动态分布[J]. 土壤,2003,35 (3): 242-247.
Xing W Q, Wang L Q, Li L P, Li S X. Effect of water-fertilizer spatial coupling on corn in semi-arid area Ⅱ: Dynamic distribution of water and available nitrogen in soil[J]. Soils,2003,35 (3): 242-247.

[14] 潘英华, 康绍忠. 交替隔沟灌溉水分入渗特性[J]. 灌溉排水,2000, 19 (1):1-4.
Pan Y H, Kang S Z. Water infiltration characteristics in alternative furrow irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 2000, 19 (1): 1-4.

[15] 李生秀,李世清,高亚军,等. 施用氮肥对提高旱地作物利用土壤水分的作用机理和效果[J]. 干旱地区农业研究,1994,12 (1): 38-46.
Li S X, Li S Q, Gao Y J *et al*. The mechanism and effects of N fertilization in increasing water use efficiency[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1994,12(1): 38-46.

[16] 李世清,李生秀. 水肥配合对玉米产量和肥料效果的影响[J]. 干旱地区农业研究,1994,12(1): 47-53.
Li S Q, Li S X. The effects of applying fertilizers and water on maize production and fertilizer-use-efficiency [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1994,12(1): 47-53.

[17] 苏德纯,任春玲,王兴仁. 不同水分条件下施磷位置对冬小麦生长及磷营养的影响[J]. 中国农业大学学报,1998,9(1): 23-24.
Su D C, Ren C L, Wang X R. Effects of placement of P_2O_5 under different soil moisture on growth and nutrients uptake of wheat [J]. Journal of China Agricultural University, 1998,9(1): 23-24.

[18] 马瑞昆,骞家利,贾秀领,刘淑贞. 供水深度与冬小麦根系发育的关系[J]. 干旱地区农业研究,1991,9(3): 1-9.
Ma R K, Qian J L, Jia X L, Liu S Z. The relationship between the depth of supply water and the development of winter wheat root system [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1991,9(3): 1-9.

[19] 王同朝,李凤民,王 俊, 等. 分层供水施磷对春小麦光合性能,同化产物流向和水分利用效率的影响[J]. 植物生态学报,1999,23(2): 177-185.
Wang T C, Li F M, Wang J *et al*. Influence of water supply and phosphorus application in different depth on photosynthetic efficiency, dry matter partitioning and water use efficiency of spring wheat[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 1999,23(2): 177-185.

[20] 何华,康绍忠,曹红霞. 限域供应 NO_3^- 对玉米根系形态及其吸收的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2002, 30(1): 5-7.
He H, Kang S Z, Cao H X. The effect of localized supply nitrate on nitrate uptake on root morphology[J]. J.of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri.and For. (Nat.Sci.Ed), 2002,30(1): 5-7.

[21] Skinner R H, Hanson J D, Benjamin J G. Nitrogen uptake and partitioning under alternate and every-furrow irrigation[J]. Plant and Soil, 1999,210: 11-20.