

## 交替隔沟灌溉和施氮对玉米根区水氮迁移的影响

刘小刚, 张富仓, 田育丰

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 【目的】研究交替隔沟灌溉条件下作物根区土壤水氮迁移和累积。【方法】利用小区试验, 对供试玉米采取不同的水分和氮素处理, 测定交替隔沟灌溉条件下玉米根区土壤硝态氮、铵态氮和水分的变化。【结果】施氮后沟中硝态氮含量增长很快, 大多集中在地表下 0~30 cm 处。随着时间的推移, 上层土壤水分携带氮素养分下渗, 造成下层土壤硝态氮含量的上升。收获时低水高氮处理的整个剖面上硝态氮的累积量最大, 是高水高氮处理的 1.2 倍, 低水低氮处理的是高水低氮的 1.27 倍。施氮后表层 0~30 cm 土壤铵态氮含量和累积量达到高峰, 30 cm 以下变化不明显。收获时各处理的铵态氮在剖面上的分布和累积基本相同。高水处理的土壤水分累积量明显大于低水处理, 氮素水平的高低对土壤水分的累积影响不大。【结论】施氮量和灌水量是影响土壤硝态氮、铵态氮和土壤水分分布和累积的最主要因素。高水处理造成根区硝态氮淋失, 降低了氮肥的利用。施氮量与硝态氮在根区剖面上的累积呈正相关。与硝态氮含量相比, 铵态氮含量较低并且变化不大。最佳的水氮耦合形式为低水高氮 (施氮量 240 kgN·ha<sup>-1</sup>, 灌水量 1485.71 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>)。

**关键词:** 交替隔沟灌溉; 玉米; 水氮迁移; 水氮累积

## Effects of Alternative Furrow Irrigation on Transport of Water and Nitrogen in Maize Root Zone

LIU Xiao-gang, ZHANG Fu-cang, TIAN Yu-feng

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi)

**Abstract:** 【Objective】Effects of alternative furrow irrigation on transport and accumulation of water and nitrogen in maize root zone were investigated. 【Method】In this plot experiment, maize was treated with different amounts of water and nitrogen. The water and nitrogen treatments included were high level and low level treatments. The mode of irrigation was alternative furrow irrigation. 【Result】NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N contents increased quickly after fertilization, most of which was concentrated in the sub-surface of 0-30 cm. With the prolonging time, the upper soil water took the nitrogen contents down while bringing the NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N contents of subsoil raised. The maximal accumulated NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N of low water and high nitrogen gained at harvest time in the whole profile was 1.2 times of that of high water and high nitrogen. The accumulation of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N of low water and low nitrogen was 1.27 times of that of low nitrogen and high water. After fertilizing, the NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N contents in the soil of 0-30 cm reached a peak, though the contents basically did not change in the soil of 30 cm below. The accumulation and distribution of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N of every treatment were basically the same at harvest time. The level of water markedly affected the accumulation and distribution of soil water content. The accumulation of soil water content of high water was greatly larger than that of low water, which was not obviously affected by the level of nitrogen. 【Conclusion】The distribution and accumulation of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and soil moisture were all affected by the amount of nitrogen and irrigation. The treatment of high water reduced the accumulation of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in root zone, as well as led to leaching and reduced nitrogen fertilizer use efficiency. The treatment of low water kept high content of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in root zone, assisted with the absorption of the crops and raised the use efficiency of water and nitrogen. A positive correlation existed in amount of nitrogen application and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N accumulation in root zone. Compared with NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, the content of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N was lower and basically did not change. The best combination

收稿日期: 2007-11-22; 接受日期: 2007-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50579066) 和高等学校学科创新引智计划项目 (111-2-16)

作者简介: 刘小刚 (1977-), 男, 甘肃镇原人, 博士研究生, 研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail: liuxiaogang888@tom.com。通讯作者张富仓 (1962-), 男, 教授, 博士, 研究方向为节水灌溉理论与技术。Tel: 029-87091151; E-mail: zhangfucang@tom.com

was the treatment of low water and high nitrogen (nitrogen rate was  $240 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$  and irrigation water quota was  $1485.71 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ).

**Key words:** Alternative furrow irrigation; Maize; Water and nitrogen transport; Water and nitrogen accumulation

## 0 引言

【研究意义】交替隔沟灌溉技术作为地面节水灌溉技术之一,具有节水、减少土壤水分深层渗漏等特点<sup>[1-6]</sup>。研究交替隔沟灌溉条件下作物根区水氮迁移和累积,对于提高灌水和肥料的利用效率、节水节肥具有重要的理论和现实意义。【前人研究进展】国内外许多学者对交替沟灌条件下作物的生长发育、产量、水分利用效率等方面进行了较多研究<sup>[7-13]</sup>。研究结果表明,通过改变和调节作物根区区域的湿润方式,可使其产生水分胁迫的信号传递至叶气孔,减小奢侈的蒸腾耗水。同时可以改善根系的吸收功能,亦可减少棵间全部湿润时的无效蒸发和总的灌溉用水量,达到以不牺牲光合产物积累和产量而大幅度提高水肥利用效率的目的。Lehrsch 等<sup>[14]</sup>研究了不同隔沟灌溉方式对玉米生长和硝态氮淋洗的影响,结果显示交替隔沟灌溉在维持作物产量的同时,可使土壤氮的吸收增加 21%。Skinner 等<sup>[15]</sup>研究了交替和常规沟灌方式下玉米对氮素的吸收和分配,认为交替隔沟灌并将肥料施于干沟内可减少肥料淋溶的可能性,与常规灌溉相比交替沟灌施肥条件下土壤硝态氮含量在营养生长期和生殖生长期较高。Benjamin 等<sup>[16]</sup>研究了隔沟灌溉带状施肥对玉米生长和氮肥吸收的影响,认为在干旱年份氮肥施在不灌水沟,氮肥吸收降低 50%,在相对湿润年份,灌水沟和不灌水沟之间肥料吸收无差异。高明霞<sup>[17]</sup>研究表明,在分根条件下不同的灌水方式影响玉米苗期根际硝态氮的分布。在湿润区交替灌溉硝态氮的累积趋势大于固定灌溉和常规灌溉。韩艳丽等<sup>[18]</sup>研究表明,交替供水方式较均匀灌水方式单位耗水量氮利用效率提高 4.54%,节水 27.6%,水分利用效率提高 5.3%。邢维芹等<sup>[19]</sup>对半干旱地区玉米交替隔沟灌溉的水肥效应进行了研究,结果表明,水肥异区交替灌水和水肥同区交替灌水是较好的水肥空间耦合方式。【本研究切入点】以往的研究主要集中在交替隔沟灌溉对作物生长的宏观效应以及引起这种效应的生理学机制方面,对该灌水技术条件下根区土壤的水氮变化动态研究较少,缺乏对作物根区土壤水氮的综合考虑,因此难于依据土壤水氮条件的改变定量确定更有效的灌水和施氮的优化决策,达到节水、节肥的目标。【拟解决的关键问题】本文旨在对春玉米交替隔沟灌条件

下根区土壤水分和氮素的变化动态以及累积进行研究,探求该灌水技术对作物根区土壤水分和氮素的分布和累积的影响,为改善农田水氮环境提高水氮利用效率提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2006 年 4~9 月在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室试验田里进行。试验点位于北纬  $34^{\circ}20'$ ,东经  $108^{\circ}24'$ ,海拔 521 m。土壤容重为  $1.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,分析耕层(0~20 cm)土壤,重量田间持水量为 24%,有机质含量为  $15.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮含量为  $0.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全磷含量为  $0.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全钾含量为  $18.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,硝态氮含量为  $74.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,铵态氮含量为  $8.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷含量为  $14.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,肥力属于中等偏上。供试作物为玉米(豫玉 22 号)。

### 1.2 试验设计

试验采用大田垄植交替隔沟灌溉技术,沟和垄的断面为梯形。垄的下底为 0.4 m,上底为 0.2 m,沟的下底为 0.2 m,上底为 0.4 m,沟长为 3 m。试验设水分处理和氮肥处理,各为两个水平。高氮水平的施氮量为  $240 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ ,低氮为  $120 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ 。高水和低水水平的灌水量见表 1。4 个处理为高水高氮( $H_w H_N$ )、高水低氮( $H_w L_N$ )、低水高氮( $L_w H_N$ )和低水低氮( $L_w L_N$ )。每个处理重复 3 次,合计 12 个小区。小区为东西方向,四周开阔,每个小区面积为  $15 \text{ m}^2$ 。试验为完全随机区组试验。播种前深翻并平整土地,挖沟起垄。磷肥选用过磷酸钙,施磷( $P_2O_5$ )量为  $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ,作为底肥在深翻土地前一次性均匀撒施。氮肥选用尿素,分两次施入。苗期(5 月 23 日)施入 40%,拔节期(7 月 3 日)施入 60%。开沟施入尿素,沟深 15 cm 左右,施后覆土。垄上不施。4 月 27 日垄上点播,种植密度为  $0.6 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 。5 月 22 日定苗,9 月 6 日收获。灌水水量用低压管出水口处精确水表测量。各生育期降雨量见表 1。

### 1.3 样品采集与测定

全生育期取土样 4 次,分别于播种后 30、61、75 和 139 d。土钻取土,取土位置在垄和两个沟的中心。每 10 cm 取一个土样,取至 80 cm。一部分土样用烘干法测定含水率,另一部分新鲜土样风干后磨碎过筛

待测氮素。土壤无机氮采用  $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KCl}$ （土液比 1 : 5）浸提，铵态氮测定采用靛酚蓝比色法，硝态氮用紫外可见分光光度计测定<sup>[20]</sup>。环刀法测土壤容重。

土壤剖面硝态氮或铵态氮累积量的计算公式：

$$A=c\times h\times BD\times 0.1$$

式中，A 为硝态氮或铵态氮累积量 ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )，c 为土

壤矿物氮的含量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )，h 为土层厚度 (cm)，BD 为土壤容重 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )。

土壤水分累积量的计算公式：

$$A=\theta\times h\times 10$$

式中，A 为土壤贮水量 (mm)， $\theta$  为土壤体积含水率，h 为土层厚度 (cm)。

表 1 玉米不同生育期灌水处理和有效降雨量

Table 1 Irrigation treatment and rainfall in maize growth period

	播种~出苗	出苗~拔节	拔节~抽穗	抽穗~灌浆	灌浆~蜡熟	蜡熟~收获	全生育期
	Sowing-seeding	Seeding-jointing	Jointing-tasseling	Tasseling-filling	Filling-milk ripe	Milk ripe-maturity	Whole stages
起讫日期 Date	4.27~5.5	5.6~6.5	6.6~7.3	7.4~7.20	7.21~8.16	8.17~9.6	4.27~9.6
灌水日期 Irrigation date	4.27	5.12 5.30	6.6 6.20	7.5 7.18	7.25 8.6	8.19	
高水 High water ( $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ )	76.19	152.38	228.57	285.71 285.72	142.85 142.86	333.33 333.34	95.24
低水 Low water ( $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ )	76.19	114.28	171.43	190.47 190.48	114.28 114.29	228.57 228.57	57.14
有效降雨量 Rainfall (mm)	1.4	44.8	22.9	31.9	23.1	29.5	153.6

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水氮处理对玉米根区土壤矿质氮和土壤水分分布的影响

由于垄上土壤矿物氮的含量较低并且变化不大，因此用两个沟中同一层次上测得数据的平均值进行分析。图 1 表示不同处理土壤硝态氮的动态变化。图 1 表明，播后 30 d（苗期施氮 5 d 后）所有处理在剖面 10 cm 处土壤硝态氮含量为最大，高氮处理是低氮处理的 1.61 倍。主要原因是苗期土壤表层中有有机质含量较高，通气性也较好，硝化作用产生的硝态氮也较多。同时施氮主要在表层，还没有进行水分处理。播后第 3 天高水高氮和低水高氮处理的表层土壤硝态氮含量

基本相等，平均为  $169 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  左右。同样，高水低氮和低水低氮处理土壤的硝态氮也基本相等，平均为  $110 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。耕层 40 cm 以下土层中土壤硝态氮分布基本反映了土壤的本底情况。

播后 61 d（第 2 次施肥前取土），由于灌水和降雨的影响，硝态氮分布有了明显的变化，0~30 cm 处硝态氮含量较低，大于 30 cm 土层的硝态氮含量较高。由于水肥交互作用，各处理表现不一。高水处理在 30~70 cm 土壤硝态氮含量较高，而低水处理在 20~50 cm 的土壤硝态氮含量较高。

播后 75 d（拔节期施氮 10 d 后）第 3 次取土，所有处理沟中硝态氮分布和第 1 次土样硝态氮分布曲线相似，只是含量要比第 1 次土样的含量高。剖面 10 cm

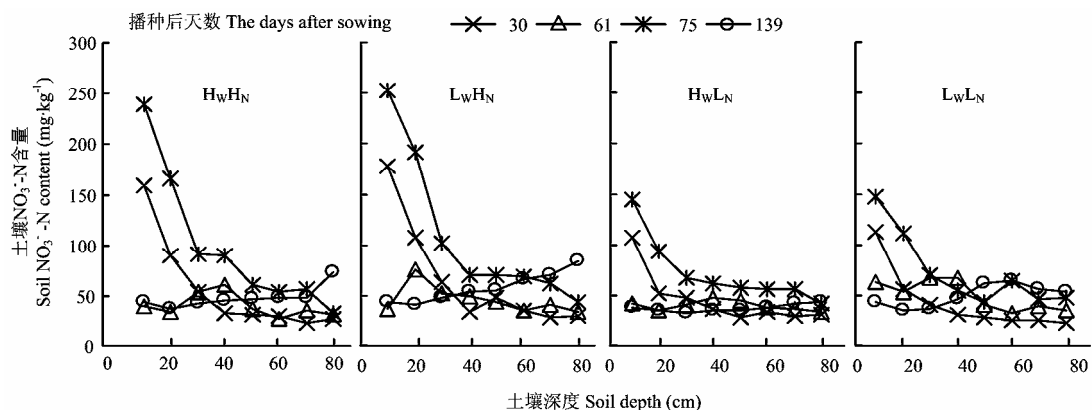


图 1 交替隔沟灌溉土壤硝态氮的动态变化

Fig. 1 The dynamics of  $\text{NO}_3\text{-N}$  content in alternative furrow irrigation

处硝态氮含量是第 1 次土样剖面 10 cm 处含量的 1.30~1.52 倍。拔节期施氮水平高低决定了沟中 0~30 cm 处土壤硝态氮含量,高氮处理的含量是低氮处理的 1.17~1.78 倍。剖面 30 cm 以下土层硝态氮的分布主要受到第 1 次施氮和灌水、降雨的影响。

播后 139 d (玉米收获时) 第 4 次取土样。经过降雨和灌水处理,上层土壤水分携带氮素养分的下渗,造成下层土壤硝态氮浓度的上升,还有作物的吸收等影响,土壤中硝态氮浓度发生了明显的变化。高水处理土壤硝态氮在 80 cm 土层处出现最大值,估计大于 80 cm 土层中还有硝态氮的淋失。而低水处理土壤硝态氮主要集中在 50~60 cm。

图 2 表示不同处理铵态氮的动态变化。与硝态氮含量相比,铵态氮含量较低并且变化不大。施氮后 0~30 cm 土层土壤铵态氮达到高峰,高氮处理在地表处可以达到 13 mg·kg<sup>-1</sup> 左右,低氮处理的可以达到 11 mg·kg<sup>-1</sup> 左右。30 cm 以下土层铵态氮含量变化不明显。

播后第 61 天和第 139 天的各水氮处理的土壤铵态氮含量基本相同。这是由于 5 月份和 7 月份地温很高,灌水后尿素水解和硝化的速度很快。尿素水解生成的铵态氮经过硝化作用完全转化成硝态氮。总的来说,同一处理的 0~30 cm 土层铵态氮含量比 30~80 cm 土层的铵态氮含量大。这是因为铵态氮易为土壤胶体所吸附,不易随水分的运动而移动。

图 3 表示不同处理土壤水分的动态变化。播后 30 d 由于还没有进行水分处理,所有处理不同层次上含水量分布基本一致。总的趋势为表层 0~40 cm 较大,而深层 60 cm 后相对较小。播后 61 d 由于蒸发蒸腾作用,地表处的土壤含水量较低,且各处理的情况基本相同。高水处理的沟中 80 cm 处含水量达到 30%左右,明显大于相同位置的低水处理 26%左右。低水处理含水量的最大值出现在剖面 60~80 cm 处。播后 75 d 由于降雨和水分处理,高水处理的土样含水量集中在 25%左右并且变化幅度不超过 20%,含水量在剖面上

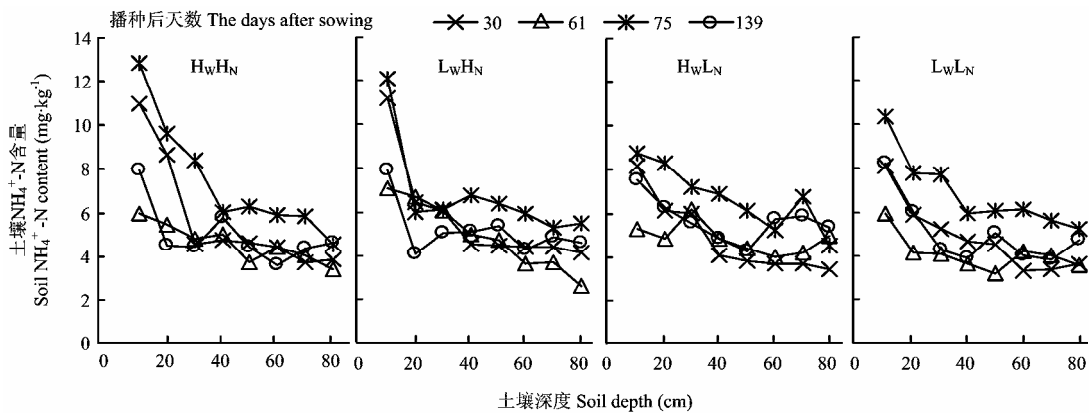


图 2 交替隔沟灌溉土壤铵态氮的动态变化  
Fig. 2 The dynamics of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in alternative furrow irrigation

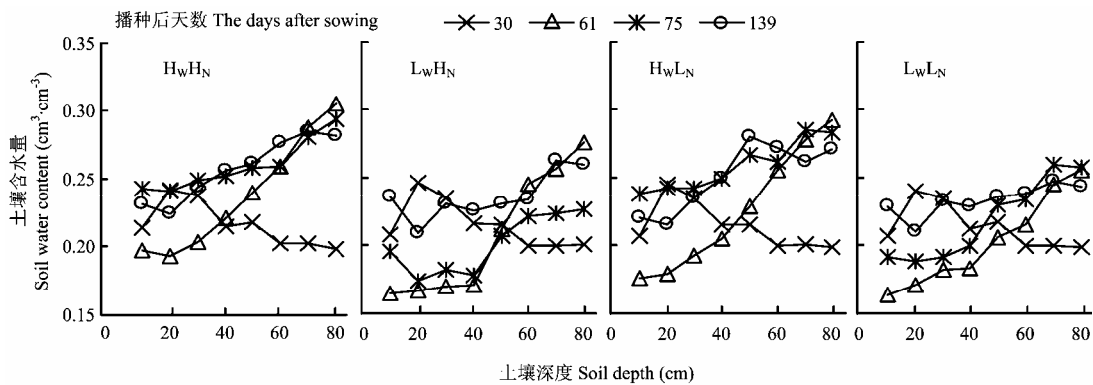


图 3 交替隔沟灌溉水分动态变化  
Fig. 3 The dynamics of soil water in alternative furrow irrigation

分布比较均匀, 最大值出现在剖面 80 cm 处, 为 30% 左右。在同一层次上, 低水处理的土样含水量小于高水处理的含水量。在整个剖面上, 低水处理的最高含水量不超过 26%。播后 139 d, 10 cm 处的含水量比 20 cm 处的大, 是因为少量的降雨所致。高水处理整个剖面上的含水量都比较大, 平均在 25% 左右, 50~80 cm 处的含水量基本上都超过了 26%, 0~50 cm 的含水量比 50~80 cm 的含水量小, 说明在收获时土壤水分主要集中在根区以下, 从而造成了大量的硝态氮

的淋失。

## 2.2 不同水氮处理对玉米根区土壤矿质氮和土壤贮水量的影响

### 2.2.1 不同水氮处理对土壤硝态氮累积的影响

由表 2 可知, 播后 30 d 由于没有进行水分处理, 施氮是影响硝态氮累积的主要因素。硝态氮的累积主要集中在耕层, 剖面 0~40 cm 的累积量占整个剖面累积量的 60%~70%。高氮处理硝态氮在整个剖面上的累积总量是低氮处理的 1.2~1.4 倍。

表 2 土壤剖面水分和氮素的累积量

Table 2 Accumulated water and nitrogen in soil profiles

土层 Soil layer (cm)	播种后天数 Days after sowing (d)															
	30				61				75				139			
	H <sub>w</sub> H <sub>N</sub>	H <sub>w</sub> L <sub>N</sub>	L <sub>w</sub> H <sub>N</sub>	L <sub>w</sub> L <sub>N</sub>	H <sub>w</sub> H <sub>N</sub>	H <sub>w</sub> L <sub>N</sub>	L <sub>w</sub> H <sub>N</sub>	L <sub>w</sub> L <sub>N</sub>	H <sub>w</sub> H <sub>N</sub>	H <sub>w</sub> L <sub>N</sub>	L <sub>w</sub> H <sub>N</sub>	L <sub>w</sub> L <sub>N</sub>	H <sub>w</sub> H <sub>N</sub>	H <sub>w</sub> L <sub>N</sub>	L <sub>w</sub> H <sub>N</sub>	L <sub>w</sub> L <sub>N</sub>
硝态氮 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (kg·ha <sup>-1</sup> )																
0~10	209.6	145.3	228.6	150.3	69.1	56.5	64.1	56.9	319.3	232.8	348.0	199.1	59.0	50.9	61.3	58.2
10~20	118.6	69.0	135.6	80.4	66.0	49.7	101.1	48.1	226.6	112.3	258.8	138.7	49.6	48.1	58.9	47.5
20~30	71.9	62.8	81.5	57.8	107.2	70.3	73.3	87.3	126.9	92.3	129.6	84.6	56.9	44.1	71.2	49.2
30~40	43.3	48.4	45.1	42.1	89.8	63.3	67.2	82.2	117.4	83.0	107.3	69.7	60.3	46.9	85.1	62.9
40~50	43.5	41.2	66.2	37.4	53.8	61.1	62.4	47.2	81.1	75.3	88.9	56.9	64.0	49.5	89.3	85.9
50~60	42.0	43.1	52.4	36.7	49.2	52.6	50.6	35.5	66.1	69.9	83.0	75.0	66.8	52.6	97.7	89.2
60~70	34.6	42.7	41.6	37.8	54.5	51.1	55.7	44.0	59.8	71.8	75.3	63.1	68.8	60.4	107.8	80.5
70~80	39.3	40.4	43.6	34.2	56.9	50.9	54.1	41.9	52.3	68.4	56.9	64.6	104.6	63.7	119.5	56.3
0~80	602.8	492.9	694.6	476.7	546.5	455.5	528.5	443.1	1049.5	805.8	1147.8	751.7	530.0	416.2	690.8	529.7
铵态氮 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (kg·ha <sup>-1</sup> )																
0~10	14.5	10.8	14.9	10.8	7.9	6.9	9.4	7.9	17.0	11.6	16.1	13.7	10.5	9.9	10.6	11.0
10~20	11.5	8.0	8.5	7.9	7.2	6.4	8.9	5.5	12.7	11.0	8.0	10.5	6.0	8.3	5.4	8.0
20~30	6.0	8.0	8.1	6.9	6.4	8.1	8.1	5.5	11.2	9.4	8.1	10.2	5.9	7.3	6.7	5.6
30~40	6.3	5.4	6.0	6.3	6.6	6.4	6.6	4.8	7.9	9.2	9.1	7.9	7.6	6.4	6.8	5.2
40~50	6.3	5.2	6.1	6.2	5.2	6.1	6.6	4.4	8.7	8.4	8.8	8.4	6.2	5.8	7.4	7.0
50~60	6.1	5.1	6.2	4.6	6.1	5.5	5.0	5.8	8.2	7.2	8.3	8.5	4.9	7.9	5.9	5.6
60~70	5.3	5.2	6.2	4.9	5.8	5.9	5.2	5.8	8.3	9.6	7.5	8.1	6.2	8.3	6.9	5.5
70~80	5.5	4.8	5.9	5.2	4.8	7.1	3.7	5.1	6.5	6.4	7.9	7.5	6.5	7.6	6.5	6.7
0~80	61.5	52.5	61.9	52.8	50.0	52.4	53.5	44.8	80.5	72.8	73.8	74.8	53.8	61.5	56.2	54.6
土壤贮水量 Soil water storage amount (mm)																
0~10	21.4	20.9	21.0	20.9	19.7	17.8	16.6	16.5	24.2	24.0	19.7	19.3	23.1	22.2	23.7	23.1
10~20	24.1	24.7	24.8	24.2	19.4	18.1	16.9	17.3	24.1	24.3	17.6	19.0	22.4	21.8	21.1	21.2
20~30	23.7	23.7	23.7	23.7	20.4	19.5	17.2	18.4	25.0	24.4	18.4	19.3	24.5	23.6	23.2	23.5
30~40	21.5	21.7	21.8	21.4	22.1	20.6	17.3	18.5	25.2	25.2	17.9	20.1	25.6	25.1	22.8	23.1
40~50	21.8	21.7	21.6	22.0	23.9	23.0	21.3	20.8	25.8	26.9	21.0	23.1	26.1	28.2	23.3	22.8
50~60	20.3	20.1	20.2	20.1	25.9	25.7	24.7	21.7	26.0	26.3	22.3	23.6	27.7	27.4	23.6	22.9
60~70	20.2	20.3	20.1	20.2	28.8	27.9	25.9	24.6	28.1	28.7	22.5	26.1	28.5	26.3	24.4	23.9
70~80	19.8	20.1	20.3	20.0	30.6	29.4	27.7	25.7	29.4	28.5	28.9	26.0	28.2	27.3	24.1	23.5
0~80	172.8	173.2	173.5	172.5	190.8	182.0	167.6	163.5	207.8	208.3	168.3	176.5	206.1	201.9	186.2	184.0

播后 61 d (拔节期施氮前) 地表 20 cm 的累积量明显减小, 这主要是因为经过灌水处理, 硝态氮随着土壤水分向下迁移。低水处理的硝态氮累积集中在 20~40 cm 土层, 而高水处理的累积集中在 30~50 cm 土层。同一施氮条件下, 整个剖面上高水处理的土壤硝态氮累积量比低水处理的小。同一水分条件下, 整个剖面上高氮处理的累积量比低氮处理的大, 高氮处理的累积量是低氮处理的 1.2 倍左右。与苗期整个剖面的累积量相比, 所有处理都有所减少。其中低水高氮减小的幅度最大, 达到  $166 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , 高水高氮次之, 低水低氮最小。

播后 75 d (拔节期施氮 10 d 后) 各处理土壤剖面硝态氮的累积量都有所增大。0~20 cm 土层硝态氮累积量占整个剖面的 50% 左右。同一水分条件下, 整个剖面上硝态氮的累积总量高氮处理比低氮处理的大。不同氮素水平条件下, 水分对整个剖面上硝态氮累积量影响各异, 低水高氮大于高水高氮, 高水低氮大于低水低氮。和其它 3 次取样所获数据相比, 播后 75 d 硝态氮在整个剖面上的累积量最大。这是因为苗期和拔节期施氮以及适量的灌水处理, 绝大多硝态氮集中在 0~80 cm 土层上。总的来看, 剖面各层的累积从地表到深层依次降低, 各处理在 70~80 cm 土层硝态氮的累积量都基本相等, 为  $55 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  左右。

播后 139 d (收获时) 硝态氮在剖面上累积量代表了硝态氮残留量的多少, 低水高氮整个剖面上的累积量最大, 是高水高氮处理的 1.3 倍, 低水低氮是高水低氮的 1.27 倍。和播后 75 d 相比, 各处理累积量都有所减小, 且减少的幅度不同。高水处理的减少量大于低水处理减少量, 高氮处理的减少量大于低氮处理减少量。高水高氮处理的减少量最多, 达  $520 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , 低水高氮减少次之, 低水低氮减少的最小。高水条件下, 整个剖面上硝态氮累积量高氮处理比低氮处理增加了  $115 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ; 低水条件下, 整个剖面上高氮处理比低氮处理的累积量增加了  $170 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 。高氮条件下, 整个剖面上高水处理比低水处理的累积量减少了  $160 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ; 低氮条件下, 整个剖面上高水处理比低水处理的累积量减少了  $110 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 。收获时单位施氮量的硝态氮相对残留值低水低氮处理最大, 低水高氮次之, 高水低氮较小, 高水高氮最小, 仅占低水低氮的一半。说明高水高氮处理更容易导致硝态氮损失, 高水处理让硝态氮产生了淋失, 降低了氮肥的利用效率。

**2.2.2 不同水氮处理对土壤铵态氮累积的影响** 表 2 显示, 所有处理的铵态氮在土壤剖面上累积规律基

本相同。播后 31 d, 10~20 cm 土层土壤铵态氮累积量占整个剖面累积量的 30%, 30~80 cm 土层土壤铵态氮分布较一致。播后 75 d 土壤铵态氮的累积分布和播后 31 d 的相似, 但整个剖面上总的累积量比播后 31 d 的多约  $20 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 。播后 61 d 和播后 139 d 在整个剖面上土壤铵态氮累积量都约为  $55 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 。整个剖面上土壤铵态氮累积量是播后 75 d 最大, 播后 30 d 次之, 播后 139 d 最小。这是因为氮肥投入对旱地土壤铵态氮影响的时间比较短暂, 在施氮后的短期内表现出增加土壤铵态氮的效果, 且主要发生在上层土壤。夏季土壤硝化能力较强, 肥料氮或土壤有机氮释放的铵态氮会很快经硝化作用形成硝态氮。

**2.2.3 不同水氮处理对土壤贮水量的影响** 由表 2 可知, 土壤贮水量的变化主要取决于灌水和降雨。苗期没有水分处理, 各处理在整个剖面的土壤贮水量约 172 mm。播后 61 d, 高水处理在整个剖面上土壤贮水量比苗期增大 10~20 mm, 低水处理在整个剖面上土壤贮水量比苗期减小 6 mm 左右。播后 75 d, 高水处理在整个剖面上土壤贮水量比苗期高约 35 mm, 低水处理在整个剖面上的土壤贮水量和苗期的基本相等。收获时高水处理在 0~40 mm 土层的土壤贮水量和低水处理同一层次上的贮水量相等, 约为 90 mm。40~80 mm 土层土壤贮水量比低水处理同一层次上高 20 mm。总的来看, 整个剖面的贮水量以高水处理在苗期最低, 播后 75 d 最高, 约为 208 mm, 收获时比播后 61 d 高约 10 mm。而低水处理在播后 61 d 最低约为 153 mm, 收获时达到最大, 约 184 mm。

### 3 讨论

潘英华等<sup>[9]</sup>对交替隔沟灌溉水分入渗规律研究表明: 和常规灌溉相比, 交替隔沟灌溉水分侧向入渗比较明显, 湿润锋到达深度小于常规灌溉。交替隔沟灌溉可以减少土壤水分的深层渗漏, 节省约 30% 的灌水量。交替隔沟灌溉中, 由于在灌水沟和非灌水沟之间没有形成零通量面, 其水分的侧向入渗明显增强, 从而减少了土壤水分发生深层渗漏的几率。虽然交替灌溉的用水量有所减少, 但其灌水均匀性与常规灌溉没有显著差异。所以采用交替隔沟灌溉方式并不影响灌水均匀度。袁锋明等<sup>[21]</sup>研究表明硝态氮难以被土壤胶体吸附, 水分在土壤剖面的向下运动是硝态氮淋溶必不可少的条件, 土壤水分的入渗和再分布是引起硝态氮入渗和再分布的动因。从本试验土壤水氮分布和累积的过程可知, 高水处理的土壤水分在土壤深度 80

cm 的地方才有可能达到最大值,且收获时整个剖面上矿物氮的累积量小于低水处理。说明高水处理导致了硝态氮的淋失,降低了水氮利用率。

谭军利等<sup>[22]</sup>研究表明,交替灌溉的硝态氮残留量比传统灌溉要高,而土壤含水量分布则相反。所以常规灌溉更容易导致硝态氮的淋失。这和潘英华等的结论是一致的。大量研究发现,土壤中硝态氮的累积量随氮肥用量的增加而增加,过量施氮引起土壤中硝态氮的大量累积<sup>[23,24]</sup>。黄绍敏等<sup>[25]</sup>研究认为土层中硝态氮相对值随降雨量增大而减小,降水量大则硝态氮向下淋溶较多。这与本试验在整个剖面上高氮处理的土壤硝态氮的累积量比低氮的高,单位施氮量的硝态氮的相对残留量高水高氮最小相一致。低水处理的硝态氮大多集中在根区土壤,淋失和损失较小。

土壤水分和氮素都是影响作物产量的最重要的因素。为提高作物产量应该考虑水肥耦合,达到水分和氮肥的利用效率最高,减少硝态氮淋失。从本试验硝态氮在根区的累积结果来看最佳的水氮耦合形式是低水高氮。在该灌水方式下,施肥位置(如氮肥施在沟里,施在垄上)和施肥方式(撒施和穴施)以及作物的吸收都会影响土壤中水氮的分布和累积。结合降雨,如何适时适量灌溉才能在根区有较大的水氮累积而不会产生淋失,如何获得最大的水氮利用率还需进一步研究。

## 4 结论

灌水、降雨和施氮是影响土壤中硝态氮和铵态氮分布的最主要因素。在半干旱地区,使用交替隔沟灌溉新技术要考虑水氮耦合。高水处理会造成根区土壤硝态氮大量淋失,从而减少硝态氮在根区土壤中累积。相同氮素水平下,低水处理能保证根区土壤较高的硝态氮含量,有利于作物的吸收和提高水氮利用率。土壤剖面硝态氮含量和累积量与施氮量呈正相关。与硝态氮含量相比,土壤剖面中铵态氮含量较低并且变化不大。在半干旱地区,高水处理导致深层土壤含水量较高,氮素处理对土壤贮水量影响不大。最佳的水氮耦合形式为低水高氮,即施氮量  $240 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ ,灌水量  $1485.71 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ 。

## References

- [1] 梁继华,李伏生,唐梅,冯毅.分根区交替灌溉对盆栽甜玉米水分及氮素利用的影响.农业工程学报,2006,22(10):68-72.  
Liang J H, Li F S, Tang M, Feng Y. Effects of alternate partial

- root-zone irrigation on water and nitrogen utilization of pot-grown sweet corn. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(10): 68-72. (in Chinese)
- [2] 康绍忠,张建华,梁宗锁,胡笑涛,蔡焕杰.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,1997,15(1):1-6.  
Kang S Z, Zhang J H, Liang Z S, Hu X T, Cai H J. The controlled alternative irrigation—A new approach for water saving regulation in farmland. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1997, 15(1): 1-6. (in Chinese)
- [3] 孙景生,康绍忠,蔡焕杰,胡笑涛.控制性交替灌溉技术的研究进展.农业工程学报,2001,17(4):1-5.  
Sun J S, Kang S Z, Cai H J, Hu X T. Review on research progress of controlled alternate irrigation techniques. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001, 17(4): 1-5. (in Chinese)
- [4] Kang S Z, Zhang L, Hu X T, Li Z J, Jerie P. An improved water use efficiency for hot pepper grown under controlled alternate drip irrigation on partial roots. *Scientia Horticulturae*, 2001, 89: 257-267.
- [5] 康绍忠,潘英华,石培泽,张建华.控制性作物根系分区交替灌溉的理论与试验.水利学报,2001,(11):80-86.  
Kang S Z, Pan Y H, Shi P Z, Zhang J H. Controlled root-divided alternative irrigation—Theory and experiments. *Shuili Xuebao*, 2001, (11): 80-86. (in Chinese)
- [6] Kang S Z, Liang Z S, Hu W, Zhang J H. Water use efficiency of controlled alternate irrigation on root-divided maize plants. *Agricultural Water Management*, 1998, 38: 69-76.
- [7] 史文娟,康绍忠.控制性作物根系分区供水的节水机理及研究进展.水科学进展,2001,12(2):270-275.  
Shi W J, Kang S Z. Water-saving mechanism and research advances in the control root-split alternative irrigation. *Advances in Water Science*, 2001, 12(2): 270-275. (in Chinese)
- [8] 梁宗锁,康绍忠,石培泽,潘英华,何立绩.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.中国农业科学,2000,33(6):26-32.  
Liang Z S, Kang S Z, Shi P Z, Pan Y H, He L J. Effect of alternate furrow irrigation on maize production, root density and water-saving benefit. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(6): 26-32. (in Chinese)
- [9] 潘英华,康绍忠.交替隔沟灌溉水分入渗规律及其对作物水分利用的影响.农业工程学报,2000,16(1):39-43.  
Pan Y H, Kang S Z. Irrigation water infiltration in furrows and crop water use of alternative furrow irrigation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(1): 39-43. (in Chinese)
- [10] 杨秀英,杜天生,潘英华,张虎如.干旱沙漠绿洲区地膜玉米控制性隔沟交替灌溉节水技术研究.干旱地区农业研究,2003,21(3):

- 74-77.
- Yang X Y, Du T S, Pan Y H, Zhang H R. Study on alternative furrow irrigation on film-mulched maize in desert oasis area. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(3): 74-77. (in Chinese)
- [11] 杜太生, 康绍忠, 胡笑涛, 杨秀英. 根系分区交替滴灌对棉花产量和水分利用效率的影响. *中国农业科学*, 2005, 38(10): 2061-2068.
- Du T S, Kang S Z, Hu X T, Yang X Y. Effect of alternate partial root-zone drip irrigation on yield and water use efficiency of cotton. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(10): 2061-2068. (in Chinese)
- [12] 孙景生, 康绍忠, 蔡焕杰, 胡笑涛. 交替隔沟灌溉提高农田水分利用效率的节水机理. *水利学报*, 2002, (3): 64-68.
- Sun J S, Kang S Z, Cai H J, Hu X T. Water saving mechanism for promoting water use efficiency by using alternate furrow irrigation techniques. *Shuili Xuebao*, 2002, (3): 64-68. (in Chinese)
- [13] 于保静, 石培泽, 杨秀英, 粟晓玲, 康绍忠. 干旱区大田玉米控制性交替隔沟灌溉需水量及需水规律研究. *甘肃水利水电技术*, 2006, 42(3): 209-212.
- Yu B J, Shi P Z, Yang X Y, Su X L, Kang S Z. The study on water demand of maize under alternate furrow irrigation in arid areas. *Gansu Shuili Shuidian Jishu*, 2006, 42(3): 209-212. (in Chinese)
- [14] Lehrsch G A, Sojka R E, Westermann D T. Nitrogen placement, row spacing, and furrow irrigation water positioning effects on corn yield. *Agronomy Journal*, 2000, 92(6): 1266-1275.
- [15] Skinner R H, Hanson J D, Benjamin J G. Root distribution following spatial separation of water and nitrogen supply in furrow irrigated corn. *Plant and Soil*, 1998, 199: 187-194.
- [16] Benjamin J G, Porter L K, Duke H R, Ahuja L R. Corn growth and nitrogen uptake with furrow irrigation and fertilizer bands. *Agronomy Journal*, 1997, 89: 609-612.
- [17] 高明霞. 不同灌水方式下玉米根际硝态氮的分布. 西北农林科技大学硕士学位论文, 2004: 27-40.
- Gao M X. Distribution of  $\text{NO}_3^-$ -N in maize rhizosphere soil under style of different irrigation. Master's Thesis of Northwest Agricultural and Forestry University, 2004: 27-40. (in Chinese)
- [18] 韩艳丽, 康绍忠. 控制性分根交替灌溉对玉米养分吸收的影响. 灌溉排水, 2001, 20(2): 5-7.
- Han Y L, Kang S Z. Effects of controlled roots-divided alternative irrigation on nutrient uptake in maize. *Irrigation and Drainage*, 2001, 20(2): 5-7. (in Chinese)
- [19] 邢维芹, 王林权, 骆永明, 李立平, 李生秀. 半干旱地区玉米的水肥空间耦合效应研究. *农业工程学报*, 2002, 18(6): 46-49.
- Xing W Q, Wang L Q, Luo Y M, Li L P, Li S X. Effect of spatial coupling between irrigation water and fertilizer on corn in semiarid area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(6): 46-49. (in Chinese)
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 49-60.
- Bao S D. *Soil Chemistry Analysis*. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 49-60. (in Chinese)
- [21] 袁锋明, 陈子明, 姚造华. 土壤中的氮素淋洗. 北京: 中国农业科技出版社, 1996: 191-208.
- Yuan F M, Chen Z M, Yao Z H. *Soil Nitrogen Leaching*. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1996: 191-208. (in Chinese)
- [22] 谭军利, 王林权, 李生秀. 不同灌溉模式下水分养分的运移及其利用. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(4): 442-448.
- Tan J L, Wang L Q, Li S X. Movement and utilization of water and nutrient under different irrigation patterns. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(4): 442-448. (in Chinese)
- [23] Miller A J, Smith S J. Nitrate transport and compartmentation in cereal root cells. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47(300): 843-854.
- [24] Coruzzi G, Bush D R. Nitrogen and carbon nutrient and metabolite signaling in plants. *Plant Physiology*, 2001, 125: 61-64.
- [25] 黄绍敏, 张鸿程, 宝德俊, 皇甫湘荣. 施肥对土壤硝态氮含量及分布的影响及合理施肥研究. *土壤与环境*, 2000, 9(3): 201-203.
- Huang S M, Zhang H C, Bao D J, Huangpu X R. Effect of applying fertilizer on content and distribution of  $\text{NO}_3^-$ -N in Chao soil and reasonable fertilizer application. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(3): 201-203. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)