

# 灌水施氮方式对玉米生育期土壤 $\text{NO}_3^-$ -N 时空分布的影响

漆栋良<sup>1</sup> 胡田田<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 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:** 在干旱区大田条件下,以制种玉米“金西北22号”为供试材料,采用交替灌水、固定灌水、均匀灌水和交替施氮、固定施氮、均匀施氮二因素三水平的完全组合方案,在拔节期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期和成熟期对0~100 cm土层分层监测植株正下方、植株正南侧和植株正北侧的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量。结果表明:监测时期内,植株南、北两侧较植株下和0~40 cm土层较40~100 cm土层的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量时空分布受灌水施氮方式影响更大。固定灌水固定施氮下,水氮同区时土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 在施氮侧下移,而水氮异区时土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 在施氮侧累积。灌浆期,40~80 cm土层的植株下,与均匀灌水相比,交替灌水下不同施氮方式的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量减少9.9%~14.4%。交替灌水均匀施氮或交替灌水交替施氮使得土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 在较长时间内维持在0~40 cm土层周围,成熟期二者0~100 cm土层的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 残留量相近,但较其他处理减少11.7%~27.3%。综上,交替灌水均匀施氮或交替灌水交替施氮使玉米生育期土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量时空分布比较合理,成熟期土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 残留量较低。

**关键词:** 玉米; 灌水方式; 施氮方式; 土壤  $\text{NO}_3^-$ -N; 时空分布

中图分类号: S158.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)02-0279-09

## Effects of Different Nitrogen Supply and Irrigation Methods on Spatial-temporal Distribution of Soil Nitrate Nitrogen during Maize Growth

QI Dongliang<sup>1</sup> HU Tiantian<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** A field experiment was conducted to investigate the effect of varying supply methods of nitrogen and irrigation on dynamics and distribution of soil nitrate nitrogen during maize (*Zay mays* L., cv. Gold northwestern 22) growth in Northwest China. Irrigation methods included alternate furrow irrigation (AI), fixed furrow irrigation (FI) and conventional furrow irrigation (CI). Nitrogen supply methods included alternate nitrogen supply (AN), fixed nitrogen supply (FN) and conventional nitrogen supply (CN), which were applied at each irrigation. Maize rows were established in west-east direction. Soil nitrate nitrogen content in south and north of the plant was measured in 0~100 cm soil depth (20 cm as an interval) before planting and at 6 collars, 12 collars, tasseling, filling and maturity stages. The results showed that spatial-temporal distribution of soil nitrate nitrogen in south and north of the plant was influenced more by varying methods of nitrogen supply and irrigation compared with that under the plant, so did that in 0~40 cm soil depth compared with that in 40~100 cm. At filling stage, soil nitrate nitrogen of irrigated side was moved down to 60~100 cm soil depth for FI coupled with FN when nitrogen and water were applied within the same furrow, and that of non-water supply side was gathered in 0~40 cm soil depth for FI coupled with FN when nitrogen and water were applied to different furrows. Compared with CI, AI reduced soil nitrate nitrogen under the plant in 40~80 cm soil depth by 9.9%~14.4% for different nitrogen supply methods. Compared with the other treatments, AI coupled

收稿日期: 2016-06-25 修回日期: 2016-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51079124)、国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA100504)和中央高校基本科研业务费专项(QN2011067)

作者简介: 漆栋良(1987—),男,博士生,主要从事节水灌溉理论与作物高效利用水氮研究,E-mail: qdl198799@126.com

通信作者: 胡田田(1966—),女,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用研究,E-mail: hutiant@nwsuaf.edu.cn

with CN or AN maintained soil nitrate nitrogen in 0 ~ 40 cm soil depth for a longer time during maize growth. Soil residual nitrate nitrogen in 0 ~ 100 cm soil depth at harvest was comparable between AI coupled with CN and AI coupled with AN, and the residual of them was reduced by 11.7% ~ 27.3% compared with those of the other treatments. Therefore, alternate furrow irrigation coupled with conventional or alternate nitrogen supply brought a relatively reasonable spatial-temporal distribution of soil nitrate nitrogen during maize growth, and lowered soil residual nitrate nitrogen at harvest.

**Key words:** maize; irrigation method; nitrogen supply method; soil nitrate nitrogen; spatial-temporal distribution

## 引言

关于氮肥损失的途径,除了氨挥发和反硝化作用外,硝态氮的淋溶是一条重要途径。调控土壤中的硝态氮含量被认为是降低氮素损失和提高氮肥利用率的关键<sup>[1]</sup>。前人研究了不同水、氮供应水平下土壤硝态氮的空间分布<sup>[2-3]</sup>和动态变化<sup>[4]</sup>,发现施氮量是造成土壤中硝态氮残留的主要因素<sup>[3]</sup>,灌水量则直接影响到硝态氮的下移<sup>[5]</sup>。合理的灌水施氮措施可使土壤中的硝态氮更多地、较长时间地维持在作物根区,易于被根系吸收,收获后其残留量减小。

垄植沟灌条件下,当灌水施氮量相同时,与常规沟灌均匀撒施氮肥相比,固定隔沟灌溉(水肥异区)有利于土壤硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)长期在剖面较浅层次中分布,利于作物吸收,被认为是较好的灌水施氮组合<sup>[6]</sup>。交替隔沟灌溉(水肥异区)使得0~60 cm土层土壤 $\text{NO}_3^-$ -N的残留量增加30%~60%,而60~200 cm土层中的土壤 $\text{NO}_3^-$ -N的残留量减少8%~44%<sup>[7]</sup>。可见,即使灌水施氮量相同,不同灌水、施氮方式下的 $\text{NO}_3^-$ -N变化及残留情况也会有所不同。

均匀沟施或撒施氮肥时,交替隔沟灌溉和常规沟灌均使得垄两侧的 $\text{NO}_3^-$ -N含量沿垄的方向呈对称分布,而固定灌溉灌水侧的 $\text{NO}_3^-$ -N含量明显小于非灌水侧<sup>[8]</sup>。与常规沟灌相比,分根区交替灌溉可以减少土壤中 $\text{NO}_3^-$ -N的残留和淋失<sup>[9-10]</sup>,促进土壤下层的 $\text{NO}_3^-$ -N向上运移<sup>[11]</sup>和作物对氮的吸收<sup>[12-13]</sup>。然而,局部沟灌条件下不同施氮方式对土壤 $\text{NO}_3^-$ -N的时空分布及残留报道较少。本文研究不同灌水施氮方式下 $\text{NO}_3^-$ -N在土壤剖面中的分布、随玉米生育期的变化动态及残留,以期为通过调控灌水施氮方式优化水肥管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验概况

试验于2012年4—9月份在农业部作物高效用水武威科学观测实验站(37°57'20"N,102°50'50"E)进行。实验站位于甘肃省武威市凉州区,地处腾格里沙漠

边缘。海拔高度1581 m,为大陆性温带干旱气候,该地区多年平均气温为8℃,多年平均降水量约为164.4 mm,年均蒸发量为2000 mm。玉米生育期内降水量为129.0 mm(最大单次降水量为20.4 mm)。试验地土壤类型为灰钙质轻砂壤土,田间持水量为21.7%(质量含水率)。土壤碱解氮质量比为50.3 mg/kg,有效磷质量比为3.82 mg/kg,有机质质量比为8.9 g/kg,土壤pH值约为8.2。灌溉水源为矿化度0.71 g/L的地下水,地下水埋深40 m以上。

供试作物为制种玉米,品种是金西北22号。采用垄植沟灌技术,沟和垄的断面为梯形。沟深30 cm,沟底宽20 cm,垄顶宽20 cm,垄底宽35 cm,沟间距55 cm,沟长5 m。小区为东西走向,四周开阔,面积24 m<sup>2</sup>(4 m×6 m)。

### 1.2 试验设计

试验采用二因素三水平随机区组设计。设施氮方式和灌水方式2个因素,各分3种不同方式:灌水方式包括交替灌水、均匀灌水和固定灌水;施氮方式包括交替施氮、均匀施氮和固定施氮。其中,固定灌水固定施氮处理又分为水氮同区(灌水沟和施氮沟相同,FFT)和水氮异区(灌水沟和施氮沟相反,FFY)2种情况,共有10个处理,见表1。随机区组排列,共3个区组,区组之间设1.5 m宽隔离带,试验布置见图1(与区组1相似,各处理在区组2、3内随机排列)。

表1 试验设计

Tab.1 Experimental design

处理	灌水方式	施氮方式
AA	交替灌水	交替施氮
AC		均匀施氮
AF		固定施氮
CA	均匀灌水	交替施氮
CC		均匀施氮
CF		固定施氮
FA	固定灌水	交替施氮
FC		均匀施氮
FFT		固定施氮
FFY		固定施氮

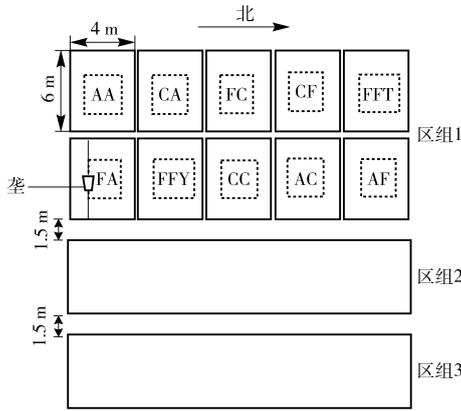


图 1 试验布置图

Fig. 1 Arrangement diagram of experiment

### 1.3 试验实施

起垄前,在垄的位置以过磷酸钙( $45 \text{ kg/hm}^2$ ,以  $\text{P}_2\text{O}_5$  计)作为底肥均匀撒施。之后,开沟起垄。4月

19日播种,9月20日收获。各处理灌水量和施氮量相同,灌溉定额  $3750 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,施氮量采用当地适宜的施氮水平  $200 \text{ kg/hm}^2$  (纯氮)<sup>[14]</sup>。灌水量在低压管出水口处用精确水表测量。灌水量和灌水时间与当地农民对制种玉米的灌水管理保持一致,共灌水5次,分别在播后3d、拔节期(播后45d)、大喇叭口期(播后84d)、抽雄期(播后98d)、灌浆期(播后119d),各灌水  $750 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。氮肥选用尿素,分3次施入,基施50%,大喇叭口期和抽雄期各25%。肥料施在沟中(垄上不施),开沟施肥,施后覆土。氮肥基施时,固定施氮在南侧(FFT)或北侧沟(FFY),交替施氮在南侧沟;其后固定施氮位置不变,交替施氮在南、北侧沟交替进行;均匀施氮在南、北两侧沟同时施氮,且两侧施氮量相等。追施氮肥时,施肥、灌水在同一天内完成。具体实施见表2。

表 2 灌水与施氮的时期与位置

Tab. 2 Time and location of irrigation and nitrogen supply

实施阶段 (DAT/d)	交替施氮	均匀施氮	固定施氮	交替灌水	均匀灌水	固定灌水
播前(-1)	南侧沟	两侧沟	南/北侧沟			
播后(3)				两侧沟	两侧沟	两侧沟
拔节期(45)				南侧沟	两侧沟	南侧沟
大喇叭口期(84)	北侧沟	两侧沟	南/北侧沟	北侧沟	两侧沟	南侧沟
抽雄期(98)	南侧沟	两侧沟	南/北侧沟	南侧沟	两侧沟	南侧沟
灌浆期(119)				北侧沟	两侧沟	南侧沟

注:固定施氮条件下,对 FFY 施氮位置为北侧沟,对 FFT 施氮位置为南侧沟。DAT 表示播种后的天数,设定播种当天的天数为 0 d。

### 1.4 测定项目与方法

(1) 土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ : 在播前、拔节期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期和成熟期采集土样,对应为播后的 -2、44、82、97、117、152 d。播前采集每个小区的土样,20 cm 为一层,取至 100 cm。拔节期开始每小区中间位置选取有代表性的植株 3 株,将地上部分剪掉。然后采用土钻法采集土壤样品。分别在植株正下方、植株正南侧 14 cm (1/4 行距处,简称株南)、植株正北侧 14 cm (1/4 行距处,简称株北) 3 个点取至 100 cm,每 20 cm 为一层,每层取土壤样品 15 ~ 20 g。土壤取样示意图见图 2。土样经风干、过筛后,用 1 mol/L KCl 震荡浸提 30 min,用 Seal Analytical continuous-flow AutoAnalyzer 3 (AA3) 型流动分析仪(德国 SEAL 公司)测定土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量。

(2) 土壤含水率:对 AC、CC 和 FC 处理,从拔节期开始采集土样,取与土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  样本对应土层的土样,在  $105^\circ\text{C}$  采用干燥法测定土壤含水率。

(3) 土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  残留量 ( $\text{kg/hm}^2$ ) 为土层厚度 (cm)、土壤容重 ( $\text{g/cm}^3$ ) 和土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量 ( $\text{mg/kg}$ ) 的乘积乘以 0.1, 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、

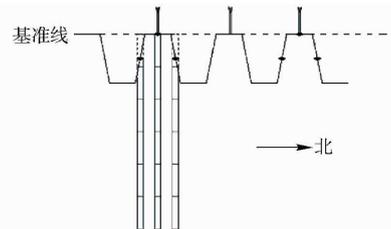


图 2 土壤取样示意图

Fig. 2 Schematic of soil sampling

40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm 和 80 ~ 100 cm 土壤容重分别按 1.32、1.40、1.55、1.58、1.60  $\text{g/cm}^3$ <sup>[15]</sup> 计算。此处土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量取植株北侧、植株南侧和植株下各土层土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量的平均值。

### 1.5 数据处理

用 SigmaPlot 软件绘图,SPSS 12.0 进行方差分析与多重比较,方差分析用 One-way ANOVA,多重比较用 Duncan 法。

## 2 结果与分析

### 2.1 灌水施氮方式对土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 空间分布的影响

考虑到最后一次施氮为抽雄期,之后的灌浆期为玉米吸收氮素的关键时期之一<sup>[16]</sup>。因此,以灌浆

期为例,分析不同处理下的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量空间分布规律(表 3 和图 3)。

不同处理(FFY 处理除外)对各土层土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量影响的方差分析表明(表 3):灌水方式、施氮方式和二者的交互作用对植株下、植株南侧和植株北侧 0~40 cm 土层中土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量的影响均达显著水平(植株下 20~40 cm 土层除外)。其中,施氮

方式在植株南、北两侧对土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量的影响可达极显著水平。40~80 cm 土层中,施氮方式在植株南、北两侧对土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量的影响显著,灌水方式对植株北侧 40~60 cm 土层和植株南侧 60~80 cm 土层中土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量影响显著。说明施氮方式比灌水方式对土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量的影响更大。

表 3 灌浆期不同处理对各土层土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量影响的方差分析

Tab. 3 Variance analysis of soil nitrate nitrogen content for different treatments at filling stage

取样位置	影响因子	土层深度/cm				
		0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
植株北侧	灌水方式	*	*	*	NS	NS
	施氮方式	**	**	*	*	NS
	灌水方式×施氮方式	**	*	NS	NS	NS
植株南侧	灌水方式	*	*	NS	*	NS
	施氮方式	**	**	*	*	NS
	灌水方式×施氮方式	**	*	NS	NS	NS
植株下	灌水方式	*	*	NS	NS	NS
	施氮方式	*	*	NS	NS	NS
	灌水方式×施氮方式	*	NS	NS	NS	NS

注: \*、\*\* 分别表示在  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  水平差异显著,NS 表示差异不显著。

土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 的具体空间变化(图 3,横坐标 14 cm 处为植株北侧,28 cm 为植株下,42 cm 处为植株南侧;下同)表现为:交替灌水条件下,3 种施氮方式在植株南侧的 40~80 cm 土层均出现土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 聚集现象;0~40 cm 土层中,交替施氮和均匀施氮在植株南、北两侧的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 分布相似,而固定施氮使得土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 在植株南侧聚集(图 3a~3c)。均匀灌水条件下,交替施氮和均匀施氮时,0~40 cm 土层中植株南、北侧土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 分布也相似。不同的是,与交替灌水相比,二者在植株下的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 下移明显,导致其在 40~80 cm 土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量土层等高线值的范围较大(图 3a、3b、3d、3e),固定施氮也不例外(图 3c、3f)。植株下,40~80 cm 土层,交替灌水下的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量是均匀灌水的 85.6%~91.1%。固定灌水条件下,交替施氮、均匀施氮和固定施氮(水氮同区)均在植株南侧的 40~80 cm 土层中出现土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 的聚集现象(图 3g~3i)。交替施氮和均匀施氮的植株南侧均出现土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 峰值明显下移现象(图 3g、3h)。0~40 cm 土层中,FFT 处理的植株南侧和 FFY 处理的植株北侧均出现土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 明显聚集现象,但是 FFY 处理的聚集度更高。FFT 处理植株南侧土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 的聚集拓展到 40~100 cm 土层(图 3i、3j)。80~100 cm 土层中,各处理(FFT 处理除外)均未出现明显的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 聚集现象。

此外,灌浆期 AC、CC 和 FC 处理的土壤质量含

水率分布与其土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 的分布表现出类似的规律(图 4)。

## 2.2 灌水施氮方式对土壤 $\text{NO}_3^-$ -N 动态变化的影响

经分析发现,各处理 0~20 cm 和 20~40 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 土层的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 均具有相似变化规律,而且,AC、CC、FFT 和 FFY 处理很具有代表性(AC 处理代表典型灌水方式,CC 处理为对照,FFT 和 FFY 处理代表特殊的灌水与施氮方式组合)。故选取 AC、CC、FFT 和 FFY 处理分析其 0~100 cm 的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量变化。上述处理的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量均表现为:播前一拔节期明显增大,拔节一大喇叭口期略微下降,大喇叭口期一抽雄期显著上升,抽雄—灌浆—成熟期持续下降的过程,整体呈“M”型变化(图 5)。

但是,各处理的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量变化幅度不同(图 5):基施氮肥以后,播前一拔节期,植株南侧 0~100 cm 的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量增幅在 FFT 处理下最大,在 FFY 处理下最小( $P < 0.05$ )。植株下的 0~40 cm 土层与植株北侧的 0~60 cm 土层表现相反。拔节一大喇叭口期,植株南侧,0~60 cm 土层的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量降幅在 FFT 处理下最大;植株北侧,相应土层的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量在 FFY 处理下最大( $P < 0.05$ )。在大喇叭口期追肥以后,大喇叭口期一抽雄期,0~40 cm 土层植株南侧和植株北侧的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量增幅与其在播前一拔节期相应增幅相似。然而,在抽雄期追肥以后,0~100 cm 土层

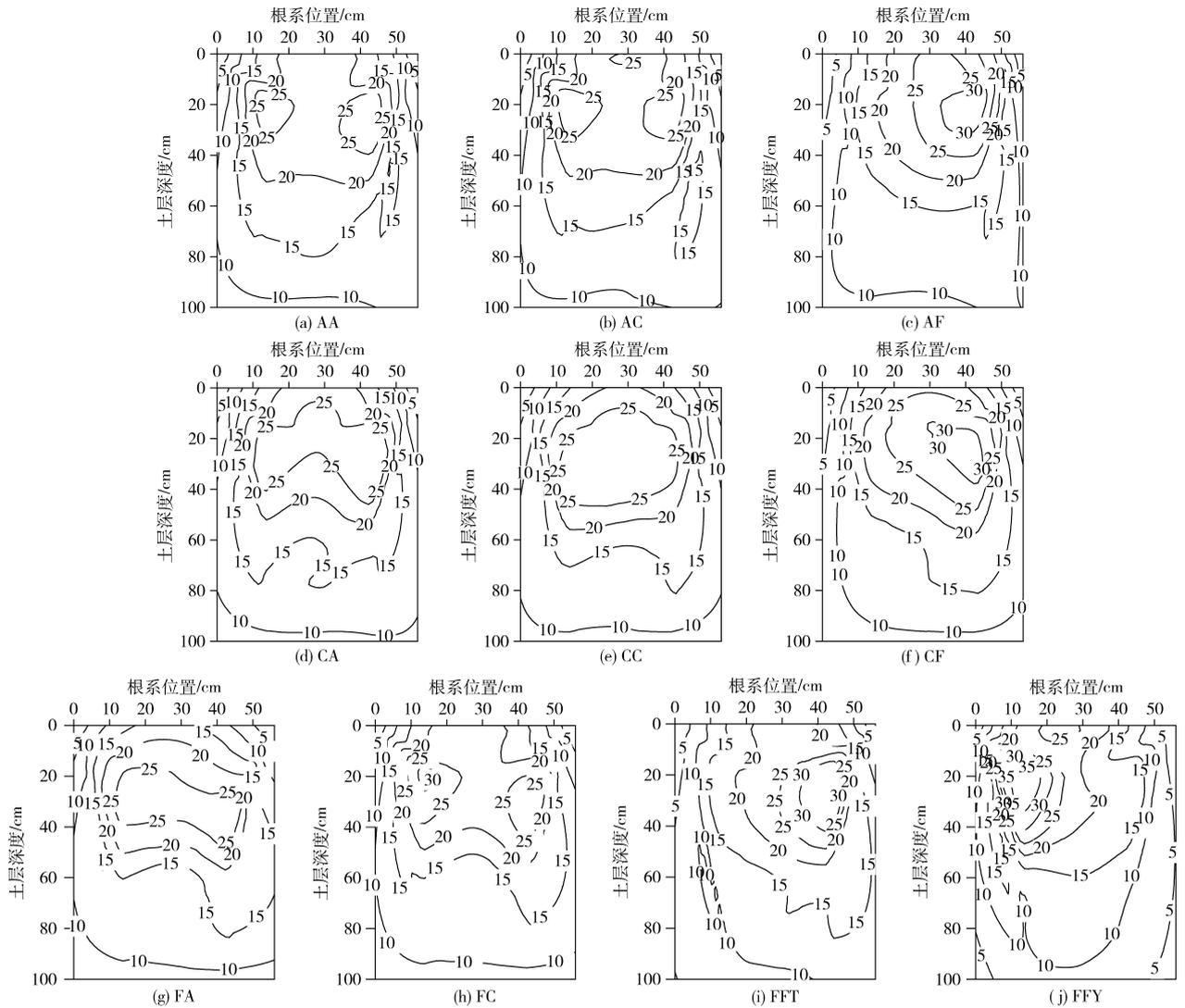


图 3 灌浆期不同处理下土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量的空间分布 (单位:  $\text{mg}/\text{kg}$ )

Fig. 3 Spatial distributions of soil nitrate nitrogen in different treatments at filling stage

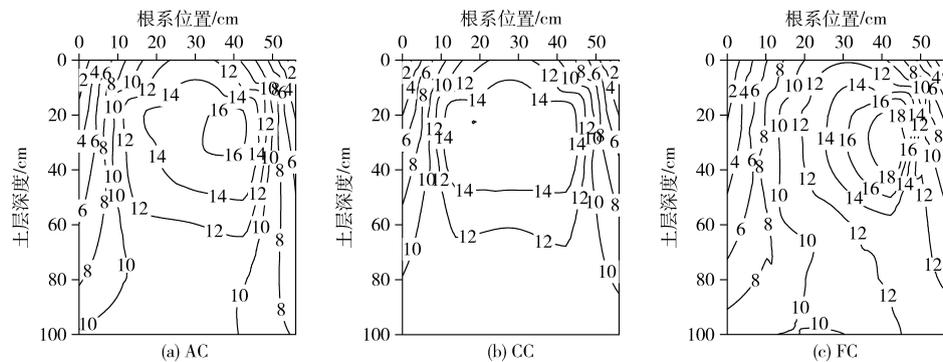


图 4 灌浆期 AC、CC 和 FC 处理下土壤质量含水率的空间分布 (单位: %)

Fig. 4 Spatial distributions of soil moisture content at filling stage for AC, CC and FC treatments

的土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量均下降。抽雄—成熟期, 0 ~ 40 cm 土层土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量的降幅在植株南侧为 FFY 处理最小, 在植株北侧为 FFT 处理最小 ( $P < 0.05$ )。抽雄—灌浆期, 40 ~ 60 cm 土层土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量的降幅在植株南侧 AC 处理最大, 在植株北侧 FFY 处理下最大 ( $P < 0.05$ )。灌浆—成熟期, 40 ~ 60 cm 土层土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量的降幅在植株北侧 CC

处理下最大, 相应时期 60 ~ 100 cm 土层土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量的降幅在植株南侧为 FFY 处理最大 ( $P < 0.05$ )。此外, 与 CC 处理相比, AC 处理下大喇叭口—成熟期 60 ~ 100 cm 土层的土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量降低 4.8% ~ 8.7%。

灌水、施氮方式对玉米生育期土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  空间分布和动态变化的影响持续体现在植株南、北两侧

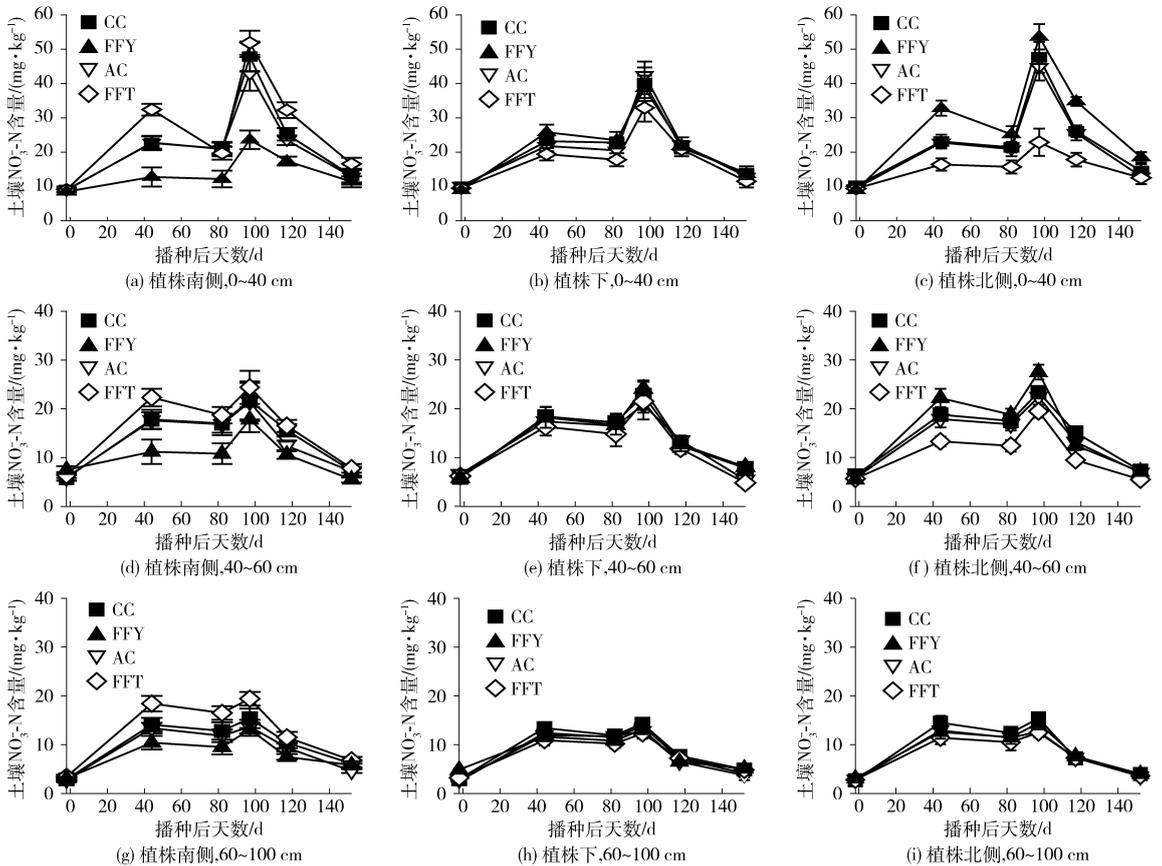


图5 AC、CC、FFT和FFY不同位置在0~100 cm土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量随播后天数的变化

Fig. 5 Dynamics of soil nitrate nitrogen content following days after planting at different positions in 0 ~ 100 cm soil depth of AC, CC, FFT and FFY treatments

和0~40 cm土层。固定施氮使植株南、北两侧土壤中土壤 $\text{NO}_3^-$ -N分布相差较大。与固定灌水和均匀灌水相比,交替灌水减少了土壤 $\text{NO}_3^-$ -N的下移(图3、图5)。交替灌水均匀施氮或交替灌水交替施氮使得土壤 $\text{NO}_3^-$ -N较长时间均匀分布在0~40 cm土层的植株南、北两侧。

### 2.3 灌水施氮方式对土壤 $\text{NO}_3^-$ -N残留量的影响

随着土层深度的增加,各处理土壤 $\text{NO}_3^-$ -N残留量均呈递减趋势。分层来看,0~40 cm土层中,FFY处理下土壤 $\text{NO}_3^-$ -N残留量大于其他处理,AC和AA处理小于其他处理;40~60 cm土层中,FFT和CF处理大于其他处理;60~80 cm土层中,FFY处理的土壤 $\text{NO}_3^-$ -N残留量小于其他处理;80~100 cm土层中,FFT处理的土壤 $\text{NO}_3^-$ -N残留量显著大于其他处理(表4)。可见,交替灌水均匀施氮或交替灌水交替施氮明显减少了0~40 cm土层土壤 $\text{NO}_3^-$ -N残留量,固定灌水固定施氮(水氮异区)与之相反。从0~100 cm土层的土壤 $\text{NO}_3^-$ -N残留总量来看:3种灌水方式下,均匀施氮和交替施氮的土壤 $\text{NO}_3^-$ -N残留量无显著差异,但均显著小于固定施氮,表明固定施氮增大了土壤 $\text{NO}_3^-$ -N的残留量。3种施氮方式下,土壤 $\text{NO}_3^-$ -N残留量由大到小表现为:固定灌水、

均匀灌水、交替灌水。FFY处理下土壤 $\text{NO}_3^-$ -N残留量最大,FFT处理次之,但大于其他处理,AA和AC处理最小(表4)。综合来看,交替灌水均匀施氮或交替灌水交替施氮有利于减少0~100 cm土层土壤 $\text{NO}_3^-$ -N的残留量。

### 3 讨论

本试验条件下,各处理灌水量和施氮量虽然相同,但是不同灌水施氮方式下土壤 $\text{NO}_3^-$ -N的空间分布(图3、表3)和动态变化(图5)不同。交替或均匀灌水时,均匀施氮和交替施氮下植株两侧土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量分布相对均匀,而固定施氮的施氮侧土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量明显大于未施氮侧,这在0~40 cm土层中体现的尤为明显(图3、图5)。这与高亚军等<sup>[5]</sup>研究结果土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量随施氮量的增加而增加相一致。此外,这一结果可能与不同灌水处理间0~40 cm土层中土壤含水率变化更加剧烈有关(图6,CI值为其在植株南、北两侧的平均值;AIS和AIN分别表示交替灌水植株南侧和北侧,FIS和FIN分别表示固定灌水植株南侧和北侧)。交替或均匀施氮时,交替灌水既利于植株南、北两侧的土壤 $\text{NO}_3^-$ -N分布相对均匀,又使得0~40 cm土层土壤

表 4 成熟期 0 ~ 100 cm 土层内不同处理土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 残留量

Tab. 4 Residual soil nitrate nitrogen content in 0 ~ 100 cm soil profile at maturity

kg/hm<sup>2</sup>

处理	土层深度/cm					
	0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	0 ~ 100
AA	29.2 ± 2.1 <sup>c</sup>	28.4 ± 1.8 <sup>c</sup>	15.6 ± 0.7 <sup>b</sup>	12.1 ± 0.6 <sup>b</sup>	10.1 ± 0.3 <sup>b</sup>	95.3 ± 2.9 <sup>f</sup>
AC	28.6 ± 2.2 <sup>c</sup>	27.2 ± 2.1 <sup>c</sup>	14.8 ± 1.3 <sup>b</sup>	11.3 ± 0.8 <sup>b</sup>	9.7 ± 0.5 <sup>b</sup>	91.5 ± 3.4 <sup>f</sup>
AF	31.3 ± 3.4 <sup>b</sup>	30.6 ± 2.7 <sup>b</sup>	17.6 ± 1.1 <sup>b</sup>	13.5 ± 1.0 <sup>b</sup>	11.7 ± 0.8 <sup>b</sup>	104.8 ± 4.8 <sup>d</sup>
CA	31.3 ± 2.8 <sup>b</sup>	30.9 ± 2.8 <sup>b</sup>	15.5 ± 1.0 <sup>b</sup>	12.8 ± 1.3 <sup>b</sup>	11.7 ± 0.8 <sup>b</sup>	103.1 ± 4.2 <sup>e</sup>
CC	30.7 ± 2.7 <sup>b</sup>	30.5 ± 3.0 <sup>b</sup>	16.6 ± 0.9 <sup>b</sup>	12.9 ± 0.7 <sup>b</sup>	11.5 ± 0.4 <sup>b</sup>	102.2 ± 2.4 <sup>e</sup>
CF	34.6 ± 3.6 <sup>ab</sup>	33.1 ± 3.5 <sup>b</sup>	18.5 ± 1.4 <sup>a</sup>	14.9 ± 1.2 <sup>a</sup>	11.3 ± 0.9 <sup>b</sup>	112.4 ± 3.5 <sup>c</sup>
FA	32.7 ± 3.8 <sup>b</sup>	31.5 ± 2.8 <sup>b</sup>	16.2 ± 1.1 <sup>b</sup>	15.5 ± 1.8 <sup>a</sup>	11.3 ± 0.8 <sup>b</sup>	107.2 ± 3.4 <sup>cd</sup>
FC	32.6 ± 3.5 <sup>b</sup>	31.6 ± 1.8 <sup>b</sup>	14.6 ± 0.8 <sup>b</sup>	14.5 ± 0.5 <sup>a</sup>	12.0 ± 1.1 <sup>b</sup>	105.3 ± 4.5 <sup>cd</sup>
FFT	34.8 ± 4.1 <sup>ab</sup>	32.5 ± 3.2 <sup>b</sup>	18.9 ± 1.3 <sup>a</sup>	16.6 ± 1.3 <sup>a</sup>	13.7 ± 1.3 <sup>a</sup>	116.5 ± 4.8 <sup>b</sup>
FFY	44.5 ± 4.8 <sup>a</sup>	42.8 ± 4.4 <sup>a</sup>	14.6 ± 0.7 <sup>b</sup>	10.6 ± 0.9 <sup>c</sup>	9.8 ± 0.4 <sup>b</sup>	123.3 ± 6.1 <sup>a</sup>

注: 同列数值后不同字母表示各土层的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 残留量差异达  $P < 0.05$  显著水平。

$\text{NO}_3^-$ -N 含量相对较高(图 3a、3b、图 5)。这与交替灌溉土壤含水率变化有关: 监测时期内 0 ~ 60 cm 灌水侧(植株南侧)与非灌水侧(植株北侧)土壤含水率呈交替上升和下降趋势, 60 ~ 100 cm 土层土壤含水率整体较低(图 6)。说明交替灌溉可以降低土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 随水向深层渗漏的概率<sup>[17]</sup>, 缓解土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 的淋洗<sup>[1]</sup>。与之相对的是均匀灌水下更多的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 向下移动(图 3d ~ 3f)。固定灌水条件下,

0 ~ 100 cm 土层灌水侧(植株南侧)的土壤含水率远大于非灌水侧(植株北侧), 且随生育期差距加大(图 6)。说明固定灌水下土壤水分侧渗较弱, 而垂直入渗的可能性较大, 使得灌水侧的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 下移明显(图 3g ~ 3i)。综上, 交替灌水均匀施氮或交替灌水交替施氮不仅利于土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 在 0 ~ 40 cm 土层分布均匀, 而且减小了土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 向 60 ~ 100 cm 土层移动的概率。

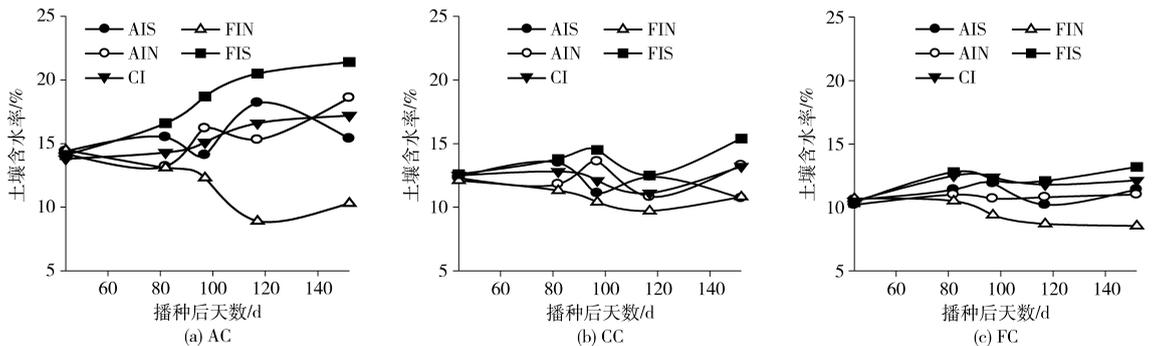


图 6 AC、CC 和 FC 处理下 0 ~ 100 cm 土层植株南、北两侧土壤含水率随生育期的变化

Fig. 6 Changes of soil moisture content in south and north of plant in 0 ~ 100 cm soil depth during growth period for AC, CC and FC treatments

本文结果表明, 土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量总体以拔节期和抽雄期为峰值点, 呈“M”型变化。2 次极值都出现在施氮后, 所不同的是拔节期一大喇叭口期土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量轻微下降, 而抽雄期—灌浆期降幅剧烈(图 4)。原因可能在于: 抽雄期之前有 2 次施氮, 且施氮量占总施氮量的 75%, 氮素供应相对充裕。虽然拔节期到大喇叭口期营养生长加快, 但由于根系生长发育尚不完全, 使得玉米在此阶段吸氮量有限<sup>[18]</sup>。抽雄期虽然施用氮肥, 但玉米生长已进入旺盛的生殖生长期, 抽雄期—灌浆期内氮素消耗极大<sup>[19]</sup>, 致使该阶段土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量剧烈下降。总体来看, 这一变化与施氮时间、施氮量以及玉米不同生育期对土壤氮素的消耗规律相一致。

不同灌水施氮方式下土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量随玉米生育期的变化也有不同。如 40 ~ 60 cm 土层, 抽雄期—灌浆期, AC 处理下植株南侧(图 5d)和 FFY 处理下植株北侧(图 5f)土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量降幅明显增大。可能的原因是, 对于 AC 处理, 一方面, 其不但可以促进根系生长, 而且使得根系在植株南、北两侧分布相对均匀<sup>[20]</sup>。当该时期氮素消耗量较大时, 0 ~ 40 cm 土层氮素供应可能不足, AC 处理下发育良好的根系更利于对 40 ~ 60 cm 土层相对盈余的氮素吸收<sup>[21]</sup>。另一方面, 改善的根系使得 0 ~ 40 cm 土层的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量由于强烈吸收而显著降低, 40 ~ 60 cm 土层的部分土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 会在质流作用下运移到 0 ~ 40 cm 土层<sup>[22]</sup>。此外, 交替灌水处理

抽雄期的灌水位置在植株南侧,相对充足的水分供应(图4)可能加剧了该侧土壤 $\text{NO}_3^-$ -N的消耗<sup>[23]</sup>。对于FFY处理,0~40 cm土层植株北侧(施氮侧)的根系生长可能在局部高氮环境条件下受到抑制<sup>[24]</sup>,迫使根系更多地向下生长,如此,当需要大量氮素时,40~60 cm土层植株北侧相对较高的氮素成为理想的氮素供应源。可见,土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量的大幅下降与局部范围内根系的大量生长密切相关<sup>[25]</sup>。

固定灌水固定施氮时水氮同区(FFT)和水氮异区(FFY)均出现土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量的明显聚集(图3i、3j),成熟期土壤 $\text{NO}_3^-$ -N的残留量大于其他处理(表4)。原因可能在于,非灌水侧根系的充分生长是实现水氮异区组合促进氮素吸收和减少土壤 $\text{NO}_3^-$ -N残留的保证<sup>[26]</sup>。笔者之前的研究也表明,固定灌水固定施氮严重抑制了根系生长<sup>[20]</sup>,导致FFT和FFY处理的吸氮量显著小于其他处理(FFT和FFY处理的吸氮量分别为127 kg/hm<sup>2</sup>和114 kg/hm<sup>2</sup>,其他处理吸氮量在138~195 kg/hm<sup>2</sup>之间),从而使更多的土壤 $\text{NO}_3^-$ -N残留下来。说明该试验条件下,FFT和FFY处理均不利于作物对氮素的吸收。研究还发现,固定灌水固定施氮(水氮同区)的植株南侧(灌水施氮侧)土壤 $\text{NO}_3^-$ -N下移明显(图3g),成熟期60~100 cm土层土壤 $\text{NO}_3^-$ -N的残留量最大(表4)。这可能与土壤含水率的变化有关,固定灌溉时,水分在土壤剖面上以垂直运动为主<sup>[17]</sup>,使得灌水侧土壤水分下移明显(图4和图6),带动 $\text{NO}_3^-$ -N移动。本试验中表现为固定灌水固定施氮(水氮同区)植株南侧土壤 $\text{NO}_3^-$ -N更多的下移到60~100 cm土层中,而不是侧渗到0~40 cm土层的植株下(图5)。说明固定灌水固定施氮(水氮同区)条件下

的土壤 $\text{NO}_3^-$ -N淋溶强烈,随水分侧向运输较弱。综合来看,固定灌水水氮同区或异区不宜应用于降水稀少的干旱区作物水肥管理。

以上分析表明,土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量的初始分布与施氮方式密切相关,而进一步的分布变化则取决于不同灌水方式下的土壤水分运动状况以及施氮时期、施氮量、作物生长状况(特别是根系)等。最终,土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量的时空分布差异决定了其在成熟期的残留量,其机理有待进一步研究。

## 4 结论

(1)玉米植株南、北两侧较植株下和0~40 cm土层较40~100 cm土层土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量的时空分布受灌水施氮方式影响更大。而且,土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量空间分布受施氮方式的影响较多。

(2)固定灌水固定施氮下,水氮同区时土壤 $\text{NO}_3^-$ -N在施氮侧下移,而水氮异区时土壤 $\text{NO}_3^-$ -N在施氮侧累积。成熟期,其水氮异区的土壤 $\text{NO}_3^-$ -N残留量较水氮同区增加5.8%,较其他处理增加9.7%~34.8%。

(3)任一施氮方式下,与均匀灌水相比,交替灌水减小了植株下土壤 $\text{NO}_3^-$ -N的下移。交替灌水均匀施氮或交替灌水交替施氮有利于土壤 $\text{NO}_3^-$ -N在较长时间内维持在0~40 cm土层。成熟期时二者在0~100 cm土层土壤 $\text{NO}_3^-$ -N残留量相近,但较其他处理减少11.7%~27.3%。

(4)综合来看,供试地区交替灌水均匀施氮或交替灌水交替施氮下土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量时空分布比较合理,成熟期土壤 $\text{NO}_3^-$ -N残留量较小,淋溶的风险较低。

## 参 考 文 献

- LEHRSCHE G A, SOJKA R E, WESTERMANN D T. Furrow irrigation and N management strategies to protect water quality[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32(7-8):1029-1050.
- 岳文俊,张富仓,李志军,等.水氮耦合对甜瓜氮素吸收与土壤硝态氮累积的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(2):88-96. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view-abstract.aspx?file\\_no=20150214&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view-abstract.aspx?file_no=20150214&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.014.
- YUE Wenjun, ZHANG Fucang, LI Zhijun, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen uptake of muskmelon and nitrate accumulation in soil[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2):88-96. (in Chinese)
- 王振华,权丽双,郑旭荣,等.水氮耦合对滴灌复播油葵氮素吸收与土壤硝态氮的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(10):91-100. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view-abstract.aspx?file\\_no=20161013&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view-abstract.aspx?file_no=20161013&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.013.
- WANG Zhenhua, QUAN Lishuang, ZHENG Xurong, et al. Effects of water-nitrogen coupling on nitrogen uptake and nitrate accumulation in soil of oil sunflower in drip-irrigated multiple cropping system[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(10):91-100. (in Chinese)
- 栗丽,洪坚平,王宏庭,等.施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6):1358-1365.
- LI Li, HONG Jianping, WANG Hongting, et al. Effects of nitrogen application and irrigation on soil nitrate accumulation, nitrogen balance and use efficiency in summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6):1358-1365. (in Chinese)
- 高亚军,李生秀,李世清,等.施肥与灌水对硝态氮在土壤中残留的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(6):61-64.

- GAO Yajun, LI Shengxiu, LI Shiqing, et al. Effect of fertilization and irrigation on residual nitrate N in soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(6): 61–64. (in Chinese)
- 6 邢维芹, 王林权, 李立平, 等. 半干旱地区玉米的水肥空间耦合效应 II 土壤水分和速效氮的动态分布 [J]. 土壤, 2003, 35(3): 242–247.
- XING Weiqin, WANG Linquan, LI Liping, et al. Effect of water-fertilized spatial coupling on corn in semiarid area II dynamics distribution of water and available nitrogen in soil [J]. Soil, 2003, 35(3): 242–247. (in Chinese)
- 7 HAN K, YANG Y, ZHOU J, et al. Management of furrow irrigation and nitrogen application on summer maize [J]. Agronomy Journal, 2014, 106(4): 1402–1410.
- 8 刘小刚, 张富仓, 杨启良, 等. 不同沟灌方式下玉米根区矿物质氮迁移动态研究 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 540–547.
- LIU Xiaogang, ZHANG Fucang, YANG Qiliang, et al. Transfer of mineral nitrogen in maize root zone soil under different furrow irrigation modes [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 540–547. (in Chinese)
- 9 李平, 齐学斌, 樊向阳. 分根区交替灌溉对马铃薯水氮利用效率的影响 [J]. 农业工程学报, 2010, 16(1): 145–152.
- LI Ping, QI Xuebin, FAN Xiangyang, et al. Effect of alternate partial root-zone irrigation on nitrogen and water use efficiency of potato [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 16(1): 145–152. (in Chinese)
- 10 ZHANG L D, GA L H, ZHANG L X, et al. Alternate furrow irrigation and nitrogen level effects of water and nitrate-nitrogen in soil and root growth of cucumber in solar-greenhouse [J]. Scientia Horticulturae, 2012, 138: 43–49.
- 11 王春晖, 祝鹏飞, 束良佐, 等. 分根区交替灌溉和氨形态影响土壤硝态氮的迁移利用 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 92–101.
- WANG Chunhui, ZHU Pengfei, SHU Liangzuo, et al. Effects of alternate partial root irrigation and nitrogen forms on utilization and movement of nitrate in soil [J]. Transactions of the CASE, 2014, 30(11): 92–101. (in Chinese)
- 12 WANG Y S, LIU F L, ANDERSEN M N, et al. Improved plant nitrogen nutrition contributes to higher water use efficiency in tomatoes under alternate partial root-zone irrigation [J]. Functional Plant Biology, 2010, 37(2): 175–182.
- 13 WANG Y S, LIU F L, NEERGAARD A D, et al. Alternate partial root-zone irrigation induced dry/wet cycles of soils stimulate N mineralization and improve N nutrition in tomatoes [J]. Plant and Soil, 2010, 337(1–2): 167–177.
- 14 杨荣, 苏永中. 水氮配合对绿洲沙地农田玉米产量、土壤硝态氮和氮平衡的影响 [J]. 生态学报, 2009, 28(3): 1460–1469.
- YANG Rong, SU Yongzhong. Effects of nitrogen fertilization and irrigation rate on grain yield, nitrate accumulation and nitrogen balance on sandy farmland in the marginal oasis in the middle of Heihe River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 28(3): 1460–1469. (in Chinese)
- 15 刘玉洁, 李援农, 潘韬, 等. 不同灌溉制度对覆膜春玉米的耗水规律及产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 67–71.
- LIU Yujie, LI Yuannong, PAN Tao, et al. Study on effects of different irrigation treatments on evapotranspiration and yield in spring maize [J]. Agricultural Research in the Arid Area, 2009, 27(6): 67–71. (in Chinese)
- 16 TSAI C Y, HUBER D M, GLOVER D V, et al. Relationship of N deposition to grain yield and N responses of three maize hybrids [J]. Crop Science, 1984, 24(2): 277–281.
- 17 潘英华, 康绍忠. 交替隔沟灌溉土壤水分入渗规律及其对作物水分利用的影响 [J]. 农业工程学报, 2000, 21(7): 1–5.
- PAN Yinghua, KANG Shaozhong. Irrigation water infiltration in furrows and crop water use of alternate furrow irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2000, 21(7): 1–5. (in Chinese)
- 18 CHIKOWO R, MAPFUMO P, NYAMUGAFATA P, et al. Nitrate-N dynamics following improved fallows and maize root development in a Zimbabwean sandy clay loam [J]. Agroforestry Systems, 2003, 59(3): 187–195.
- 19 HIREL B, GOUIS J L, NEY B, et al. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches [J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(9): 2369–2387.
- 20 漆栋良, 胡田田, 吴雪, 等. 适宜灌水施氮方式利于玉米根系生长提高产量 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 144–149.
- QI Dongliang, HU Tiantian, WU Xue, et al. Rational irrigation and nitrogen supply methods improving root growth and yield of maize [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 144–149. (in Chinese)
- 21 WANG H Q, LIU F L, ANDERSEN M N, et al. Comparative effects of partial root-zone drying and deficit irrigation on nitrogen uptake in potatoes (*Solanum tuberosum* L.) [J]. Irrigation Science, 2009, 27(6): 443–447.
- 22 宋海星, 李生秀. 根系的吸收作用及土壤水分对硝态氮、氨态氮分布的影响 [J]. 中国农业科学, 2005, 38(1): 96–101.
- SONG Haixing, LI Shengxiu. Effects of roots uptake function and soil water on  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{NH}_4^+$ -N distribution [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(1): 96–101. (in Chinese)
- 23 LIS X, WANG Z H., MALHI S S, et al. Nutrient and water management effects on crop production, and nutrient and water use efficiency in dry land area in China [J]. Advances in Agronomy, 2009, 102: 223–265.
- 24 TIAN Q Y, CHEN F J, LIU J L, et al. Inhibition of maize root growth by high nitrate supply is correlated with reduced IAA levels in roots [J]. Journal of Plant Physiology, 2008, 165(9): 942–951.
- 25 WANG L, DE KROON H, SMITS A J M. Combined effects of partial root zone drying and patchy fertilizer placement on nutrient acquisition and growth of oilseed [J]. Plant and Soil, 2007, 295(1–2): 207–216.
- 26 SKINNER R H, HAN J D, BENJAMIN J G. Nitrogen uptake and partitioning under alternate and every-furrow irrigation [J]. Plant and Soil, 1999, 210(1): 11–20.