

畦灌不同液施模式下水氮空间分布特征

高剑民^{1,2}, 吕谋超^{1*}, 邓忠¹, 李迎¹, 胡兰^{1,2}, 忠智博^{1,2}

(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所/农业部节水灌溉工程重点实验室, 河南 新乡 453002;

2. 中国农业科学院 研究生院, 北京 100081)

摘要:【目的】改善土壤水氮分布。【方法】基于夏玉米生长关键期灌溉施肥的试验结果,探究畦灌不同液施模式对土壤水氮空间分布状况及其变化趋势的影响。选取畦宽(1.5、2.3、3.2 m),施肥时机(灌溉到畦长的1/3、1/2施肥和全程施肥)和改水成数(85%、90%、95%)3个因素,每个因素3个水平,设置传统畦灌进行对照,采取正交设计选取最优水平组合,以形成适合作物生长发育的土壤水氮空间分布状况。【结果】畦宽对于土壤水分沿畦长分布的变异系数有显著影响,贡献率达94.36%;改水成数影响水分和氮素沿畦长分布均匀性(DU_{WH} 和 DU_{NH} 、 DU_{NO}),尤其对氮素沿畦长分布均匀性有显著影响,贡献率分别为23.9%、91.74%和71.26%;施肥时机仅对 DU_{WH} 和 DU_{NO} 有显著影响,贡献率为56.09%和27.41%。【结论】液施条件下可以改善土壤水氮空间分布;畦宽为1.5 m、灌溉到畦长1/2时施肥,改水成数为95%的施肥方式可以形成较好的土壤水氮储存效率和水氮沿畦长分布均匀性。

关键词:畦灌;液施;施肥时机;改水成数;水氮空间分布状况

中图分类号:S275.8

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180108

高剑民,吕谋超,邓忠,等.畦灌不同液施模式下水氮空间分布特征[J].灌溉排水学报,2019,38(1):56-62.

0 引言

我国作为农业大国,水资源供需矛盾尤为突出,人均水资源占有量仅为 $2\ 100\ m^3$,约为世界人均水资源占有量的28%^[1]。相比先进的灌水方法与技术,地面灌溉仍占主导地位。畦灌是我国灌溉面积最大的地面灌水方法之一^[2],具有灌水方便、田间工程设施简单、低投资、低能耗、实施管理简便等优点^[3],在我国,95%以上的灌溉面积采用地面灌溉方式。地面灌溉技术在当前我国农田灌溉中占主导地位^[4],但是我国的水和肥料利用率较低^[5]。目前常见的畦灌施肥方式有2种:一是将肥料均匀撒入田块,而后进行灌溉、耕作等措施的畦灌撒施方式;二是将肥料预先溶解,通过施肥罐将肥液随灌溉水进入田间的畦灌液施方式。与撒施相比,液施不仅可有效提高化肥利用效率、控制施肥量和施肥时机,还能尽量避免由于氮素流失而引起的农田水土环境污染问题^[6]。

畦长^[7]、畦宽^[8]、改水成数、入畦流量^[9]、施肥时机、地面微地形、坡度^[10]、土壤入渗性能^[11]等畦灌水力要素是影响水氮空间分布的因素。刘懿等^[12]研究表明,氮素质量浓度在沿畦长方向地表水流受单宽流量的影响较小,且入渗时间与地表水流中氮素质量浓度为幂函数关系。国外研究^[13-15]结论以溴化物模拟氮素,但未考虑氮在土壤中各个形态之间的转化,与实际中氮素施肥结果差异较大,且国外农田大都经过精细平整,微地形条件明显优于国内,因此相关研究成果的前提条件与当前国内地面灌溉技术条件有明显差异。我国地面灌溉技术相对落后,可控性差导致水肥利用率低下,因此,提高水肥利用率和均匀性,寻求合理灌溉施肥模式,对于减轻施肥对环境的负面影响、缓解水资源供需矛盾、促进节水灌溉发展具有重要的理论和现实意义。

收稿日期:2018-02-08

基金项目:中国农业科学院基本科研业务费专项院级统筹项目(Y2017XM08);中央级科研院所基本科研业务费专项(中国农业科学院农田灌溉研究所)资助项目(FIRI2016-23;FIRI2016-26)

作者简介:高剑民(1993-),男,甘肃庆阳人。硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:463491478@qq.com

通信作者:吕谋超(1968-),男,河南柘城人。研究员,博士生导师,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:13937381585@163.com

兹基于我国灌溉施肥中使用较多的尿素肥料,在夏玉米生长关键期内进行田间液施试验,以传统撒施畦灌作为对照,研究不同畦灌液施模式下对于水氮空间分布的影响,并对灌溉施肥系统性能进行评价,探究最优的液施模式以及适合作物生长发育的水氮空间分布。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2017年6—10月在中国农业科学院新乡综合试验基地(35°18'N,113°54'E)进行。基地位于黄淮海地区中部偏西的引黄灌区,属于温带大陆性季风气候,年平均气温为14℃,年平均降雨580 mm,其中6—10月的降雨量占全年降雨量的70%~80%,蒸发量为2 000 mm,日照时间约为2 399 h,无霜期210 d。作物种植模式以冬小麦-夏玉米为主,供试作物为玉米(登海605),2017年6月20日播种,2017年10月10日收获。试验区内土壤为壤土土壤干体积质量在1 m土体内变化很小,平均值为1.51 g/cm³,土壤田间体积持水率为32.5%。作物灌溉采用畦灌方式,水源为地下水。

1.2 试验设计

选取畦宽、施肥时间、改水成数作为试验因素,相关研究表明^[16],畦长在50~70 m时沿畦长方向水分分布较为均匀,故设置畦长为60 m。根据当地农机规格设置畦宽为1.5、2.3和3.2 m。撒施易导致部分氮肥被畦灌水流冲携到畦尾,引起畦尾水流溶质质量浓度增大的“后翘”现象^[17],且改水成数影响灌水施肥系统性能,故设置不同改水成数,分别为85%、90%和95%,即灌水水流前锋推进到畦长的85%、90%和95%时停止灌水。施肥方式为液施,施用肥料为尿素,施肥时机分别为全程液施,灌水到畦长的1/3时施肥,灌水到畦长的1/2施肥。试验采取正交设计,共计12个处理,每个处理重复3次,共36个处理,如表1所示。

表1 试验设计

处理	因素		
	畦宽/m A	施肥时机 B	改水成数 C
T1	1(1.5 m)	1(全程液施)	1(85%)
T2	1(1.5 m)	2(灌水到畦长1/3时液施)	2(90%)
T3	1(1.5 m)	3(灌水到畦长1/2时液施)	3(95%)
T4	2(2.3 m)	1(全程液施)	2(90%)
T5	2(2.3 m)	2(灌水到畦长1/3时液施)	3(95%)
T6	2(2.3 m)	3(灌水到畦长1/2时液施)	1(85%)
T7	3(3.2 m)	1(全程液施)	3(95%)
T8	3(3.2 m)	2(灌水到畦长1/3时液施)	1(85%)
T9	3(3.2 m)	3(灌水到畦长1/2时液施)	2(90%)
CK1	1.5 m		
CK2	2.3 m		传统撒施
CK3	3.2 m		

在夏玉米大喇叭口期进行灌溉施肥试验,使用化肥为速溶尿素(含氮量≥46%),施用量为225 kg/hm²。液施前需要进行预试验来配制施肥液。本试验灌溉系统管道采用90 mm PVC管,每个畦田入口安装阀门,通过调节阀门的开度来调节管道的流量,利用安装在管道上的超声波流量计对流量进行调整。根据灌溉施肥要求,液施过程中利用水泵从储液罐中匀速的抽取事先配置的尿素肥液,使肥液随水流均匀的进入畦田。试验开始前,先选择撒施对照畦田做水流推进试验,记录不同畦宽处理下灌溉水流从畦首推进到畦长1/3处和畦长1/2处以及水流前锋推进到畦长的85%、90%和95%的时间,而后计算出所需配置的肥液量,以保证在试验时肥液可以均匀施入畦田。

1.3 观测项目与方法

在每个试验畦田内沿畦长方向畦田的中间每隔10 m设置1个观测点,用以监测畦田沿畦长方向纵剖面1 m内的土壤水分和氮素量。在灌水试验的前后2 d对每个测点的土壤含水率和硝态氮量进行测定,采用土钻取土,在测点的0~100 cm剖面分别采集20、40、60、80、100 cm土层的土壤样本。尿素施进土壤以后经过水解作用转化成为铵态氮,铵态氮通过硝化作用大部分转化为硝态氮^[18],此时土壤中的氮素量多以硝态氮的形式存在,氨态氮量处于较低水平,因此本试验仅对土壤中的硝态氮变化情况进行分析。用烘干法进行土壤含水率的测定,在测点附近埋设TRIME管进行比较,采用紫外分光光度计进行土壤硝态氮量的测定。

1.4 灌水施肥系统评价指标

采用变异系数 C_v 对不同处理的土壤水氮空间分布进行差异性描述, 变异系数 C_v 能反映离散分布状况和空间程度, C_{v_w} 和 C_{v_N} 分别表示沿畦长方向含水率和硝态氮量的变异系数, 计算式为:

$$C_v = \frac{SD}{MN} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: SD 为标准偏差; MN 为平均值。 C_v 值越大, 其分布越离散、变异程度越大, C_v 值越小, 其分布越集中、变异程度越小。具体而言, $C_v \leq 0.1$ 为弱变异性, $0.1 < C_v < 1$ 为中等变异性, $C_v \geq 1$ 则为强变异性^[6]。

针对水溶后可直接形成不同形态氮素的硝酸盐和硫酸盐类化肥, Zerihun 等^[10] 针对明渠供水、田尾开敞下的地面灌溉施肥系统, 提出了用于评价畦灌施肥性能的指标, 包括: 施氮分布均匀性、施氮储存率、施氮满足率和施氮损失率。对尿素而言, 其水溶液中不是直接形成不同形态的氮素, 而是过一段时间水解成为土壤铵态氮, 再经过硝化作用转化为硝态氮, 故灌后 2 d 实测的土壤硝态氮量并非施用尿素的直接结果。在本研究中, 测定灌前和灌后作物有效根系层(玉米大喇叭口期的有效根系层为 0~60 cm) 土壤的含水率和含氮量占 1 m 土层的土壤平均累积量的比例, 用来评价灌溉施肥系统的存储效率 (E_w 和 E_N), 计算式为:

$$E_w = \frac{\overline{X_{RW}}}{\overline{X_w}} \times 100\%, \quad (2)$$

$$E_N = \frac{\overline{X_{RN}}}{\overline{X_N}} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: $\overline{X_N}$ 和 $\overline{X_w}$ 分别为整个畦长 1 m 内土层的平均累积硝态氮质量浓度 (mg/kg) 和体积含水率 (%); $\overline{X_{RW}}$ 和 $\overline{X_{RN}}$ 分别为整个畦长作物有效根系层 (0~60 cm) 的平均土壤硝态氮质量浓度 (mg/kg) 和体积含水率 (%), 测定灌前和灌后作物根系层土壤的含水率和含氮量的差异, 用来评价灌溉施肥系统中土壤水分和硝态氮量沿畦长方向的均匀度 (DU_{wQ} 、 DU_{wH} 、 DU_{NQ} 和 DU_{NH})^[19], 计算式为:

$$DU_{wQ} = \frac{\overline{X_{wQ}}}{\overline{X_w}} \times 100\%, \quad (4)$$

$$DU_{wH} = \frac{\overline{X_{wH}}}{\overline{X_w}} \times 100\%, \quad (5)$$

$$DU_{NQ} = \frac{\overline{X_{NQ}}}{\overline{X_N}} \times 100\%, \quad (6)$$

$$DU_{NH} = \frac{\overline{X_{NH}}}{\overline{X_N}} \times 100\%, \quad (7)$$

式中: $\overline{X_{wQ}}$ 和 $\overline{X_{wH}}$ 分别为整个畦长具有最低值的 1/4 和 1/2 畦段在 1 m 内土层内的土壤平均体积含水率 (%); $\overline{X_{NQ}}$ 和 $\overline{X_{NH}}$ 分别为整个畦长具有最低值的 1/4 和 1/2 畦段在 1 m 内土层内的土壤累积平均硝态氮质量浓度 (mg/kg)。

1.5 统计分析

数据绘图处理采用 Excel 2010 软件和 Surfer 11.0 软件, 数据统计分析采用 SAS 9.2 软件, 差异显著性检验采用在 0.05 水平下的新复极差法。方差贡献率=因素平方和/总平方和。

2 结果与分析

2.1 土壤水氮沿畦长方向空间分布状况

2.1.1 土壤水分沿畦长方向的空间分布状况

由表 2 可知, 灌前 2 d 土壤剖面平均体积含水率沿畦长分布的变异系数 C_{v_w} 值在 0.19~0.26 之间, 分布状况为中等变异, 各处理之间无显著差异, 这是由于灌水前降雨较少, 土壤作物根系层 0~60 cm 内的水分供作物吸收, 体积含水率较低, 而 60~80 cm 土层含水率较高。如图 1 所示, 与灌前 2 d 相比, 灌后 2 d 土壤 1 m 内的含水率有所增加, 土壤含水率的空间分布趋势不具有相似性, 其中 0~60 cm 内的土壤含水率增加尤为明显。灌后 2 d 的土壤水分沿畦长方向的变异系数 $C_{v_w} < 0.1$, 分布状况为弱变异, T7—T9 处理下的 C_{v_w} 值相对于 T1—T6 处理有明显差异, 有减小的趋势, 但变化不是很明显, 说明适当的增加畦宽有助于改善土壤水分的空

间分布均匀性。各处理的畦尾部分相同土层的土壤体积含水率较低,这是受到改水成数的影响,使得畦尾受水较少。

表2 不同水力要素处理下的空间变异系数

处理	灌前2 d		灌后2 d	
	C_{VW}	C_{VN}	C_{VW}	C_{VN}
T1	0.254a	0.159a	0.070a	0.144a
T2	0.238a	0.168a	0.067a	0.148a
T3	0.256a	0.251a	0.068a	0.148a
T4	0.217a	0.114a	0.069a	0.159a
T5	0.213a	0.215a	0.068a	0.145a
T6	0.207a	0.159a	0.071a	0.137a
T7	0.253a	0.271a	0.052b	0.129a
T8	0.226a	0.124a	0.052b	0.145a
T9	0.201a	0.128a	0.045b	0.128a
CK1	0.208a	0.162a	0.068a	0.158a
CK2	0.207a	0.240a	0.060a	0.140a
CK3	0.191a	0.250a	0.065a	0.126a
畦宽	10.09ns	0.58ns	83.62*	1.11ns
方差分析 F 值				
施肥时机	3.21ns	0.11ns	1.23ns	0.38ns
改水成数	3.51ns	9.17ns	2.77ns	0.1ns

注 同列数据后不同字母表示差异显著性水平,小写字母为 $P < 0.05$ 水平显著。*和ns分别代表 $P < 0.05$ 水平上差异显著和差异不显著,下同。

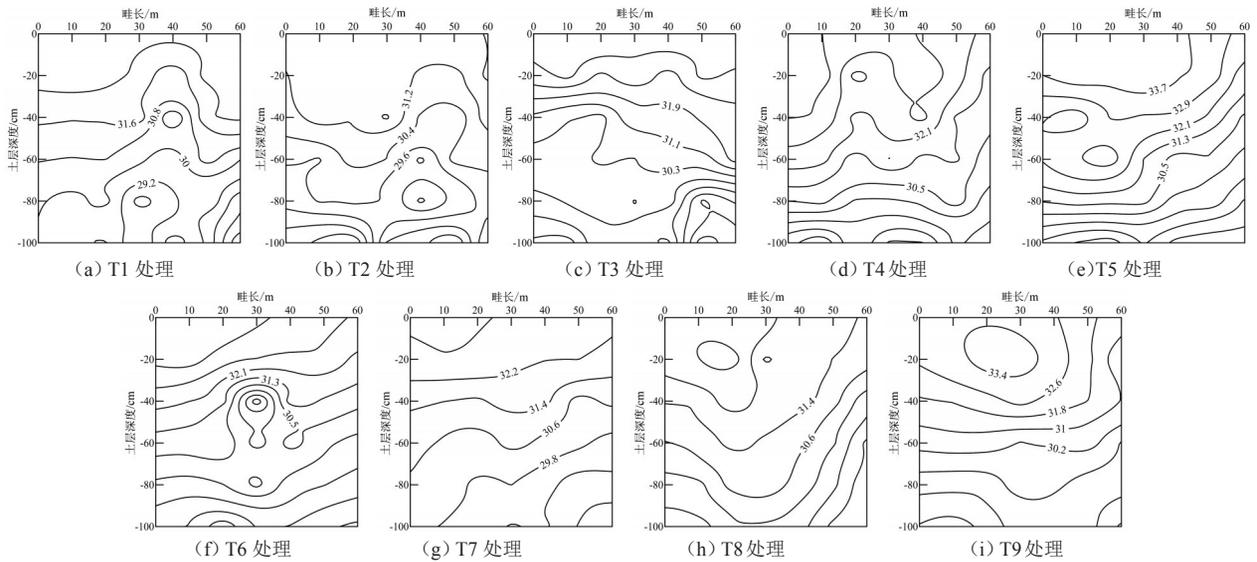


图1 夏玉米灌后2 d沿畦长土壤平均体积含水率(%)空间分布状况

由方差分析可知,畦宽对于灌后2 d土壤水分沿畦长分布有显著影响($P < 0.05$),贡献率达94%,畦宽为1.5 m和2.3 m的水平没有显著差异,与3.2 m畦宽差异显著;施肥时机和改水成数对于 C_{VW} 无显著影响($P > 0.05$),其中因素各水平之间无显著差异。

2.1.2 土壤氮素沿畦长方向的空间分布状况

由表2可知,灌前2 d的 C_{VN} 值在0.11~0.27之间,不同处理下的土壤累积平均硝态氮质量浓度沿畦长空间分布的变异系数分布不均匀,具有较大的空间分布性,分布状况属中等变异性,各处理之间没有显著差异。如图2所示,灌后2 d土壤硝态氮量在0~100 cm土层内明显增加,主要分布在0~40 cm土层。不同处理下的 C_{VN} 值在0.13~0.16之间,分布状况属中等变异性,表明不同处理对作物有效根系层土壤氮素沿畦长空间分布差异性未产生显著影响,说明夏玉米在各个土层对氮素的吸收没有差异,可能是由于灌水前氮素在畦田的分布存在较大的变异性,且灌水受到不同程度微地形和杂草的阻碍和滞留。

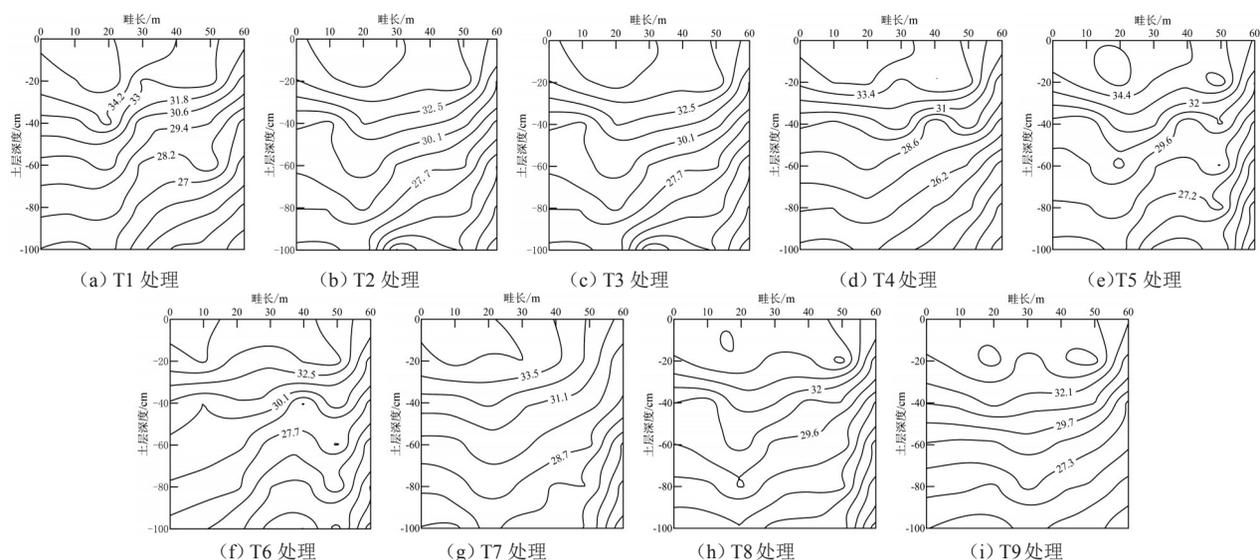


图2 夏玉米灌后2 d沿畦长土壤平均硝态氮量(mg/kg)空间分布状况

由表2可知,畦宽、施肥时机和改水成数对 C_{V_N} 无显著影响,其中畦宽对于 C_{V_N} 的影响大于施肥时机和改水成数。同一因素不同水平均值间差异均不显著。

2.2 灌溉施肥系统性能指标评价

2.2.1 土壤有效作物根系层内水氮储存效率

由表3可知,灌水2 d后的不同处理下的 E_W 在59.4%~63.36%之间, E_N 值在61.14%~64.01%之间,相同处理下的土壤氮素在作物根系层内的储存效率略高于水分储存效率,液施处理下的 E_W 略高于撒施(60.6%~61.93%),可能由于撒施后灌水,少部分肥料在田间挥发导致。其中撒施处理中,基于畦宽为2.3 m的处理(CK2),作物有效根系层内的土壤水氮储存效率(E_W 和 E_N 分别为61.93%和63.38%)略高于其他处理(60.96%、62.61%和60.60%、62.65%)。

由方差分析可知,畦宽、施肥时机和改水成数可视为 E_W 和 E_N 的影响因素,贡献率基本大于误差。其中畦宽对于 E_W 的影响大于施肥时机和改水成数,贡献率达到53%;其中因素畦宽为2.3 m水平下(T4—T6)的 E_W 和 E_N 高于其他处理。

表3 灌溉施肥性能评价指标

处理	E_W	E_N	DU_{WH}	DU_{WQ}	DU_{NH}	DU_{NQ}	
T1	61.97a	63.24ab	98.49abc	97.54a	90.10c	85.18d	
T2	59.40a	63.23ab	97.85abcd	97.74a	91.13bc	86.75bcd	
T3	63.36a	64.01a	98.71abc	97.91a	94.42a	90.09a	
T4	62.40a	63.39ab	97.20bcd	97.40a	90.28c	86.56cd	
T5	62.65a	63.26ab	94.84e	91.36a	93.35ab	89.02a	
T6	62.50a	63.18ab	98.89ab	98.32a	91.03bc	86.83bcd	
T7	61.43a	63.61ab	96.73d	95.39a	93.92a	88.15abc	
T8	61.09a	61.14b	97.01cd	95.03a	91.09bc	85.67d	
T9	61.47a	62.71ab	99.14a	98.49a	91.21bc	88.73ab	
CK1	60.96a	62.61a	96.62a	95.31a	90.82a	85.05a	
CK2	61.93a	63.38a	96.68a	96.82a	90.10a	86.39a	
CK3	60.60a	62.65a	95.91a	95.25a	90.78a	86.93a	
方差分析	畦宽	3.27ns	4.6ns	16.93ns	0.53ns	1.1ns	0.21ns
F值	施肥时机	1.05ns	3.67ns	50.25*	1.18ns	2.49ns	25*
	改水成数	0.87ns	5.02ns	21.41*	0.01ns	51*	64.99*

2.2.2 土壤水氮沿畦长分布均匀性

从表3可以看出,灌后2 d的液施模式处理下的含水率均匀度 DU_{WH} 在94.84%~99.14%之间, DU_{WQ} 在91.36%~98.49%之间,硝态氮均匀度 DU_{NH} 在90.10%~94.42%之间, DU_{NQ} 值在85.05%~90.09%之间,含水率沿畦长方向分布均匀性高于硝态氮,不同处理下土壤含水率沿畦长分布均匀性大于硝态氮。且液施处理下的土壤水分和氮素沿畦长方向的分布均匀性略高于撒施,这可能与肥料撒施在田间的挥发有关。其中撒施处理中,基于畦宽为2.3 m的处理(CK2),土壤水氮沿畦长分布均匀性较为均匀(DU_{WH} 、 DU_{WQ} 、 DU_{NH} 和 DU_{NQ} 分

别为98.68%、97.82%、92.10%和86.39%),可以形成利于作物吸收利用的土壤水氮空间分布状况。

由方差分析可知,畦宽对土壤水氮沿畦长分布均匀性无显著影响,施肥时机和改水成数对水氮沿畦长分布均匀性有显著影响,且改水成数对于土壤氮素沿畦长分布均匀性影响大于施肥时机,改水成数会导致畦田首尾的受水时间不同,对水氮分布产生较显著影响。改水成数对 DU_{NH} 和 DU_{NO} 的贡献率分别为91.74%和71.26%,施肥时机的贡献率为4.47%和27.41%。

3 讨论

玉米大喇叭口期不同畦灌液施的试验结果表明,灌后2 d作物有效根系层内(0~60 cm)的增幅较为明显,土壤水分储存效率略低于土壤氮素储存效率,但是土壤水分沿畦长分布均匀性较土壤氮素高。这与孙秀路等^[20]研究结果一致。液施条件下的土壤水氮在作物有效根系层内的储存效率(E_w 和 E_N)和土壤水氮沿畦长分布均匀性(DU_{wQ} 、 DU_{wH} 、 DU_{NH} 和 DU_{NQ})均高于撒施处理,表明液施可以提高施肥均匀性和氮素的储存效率。这是由于液施情况下的灌溉水在入渗之前的水肥已经充分混合,水流中的氮素质量浓度时空变异性较小;但也不能排除撒施条件下的肥料的不均匀撒施和灌溉水冲刷造成地表水流中的水氮分布不均匀。灌后2 d的土壤体积含水率沿畦长分布的变异系数 $C_{Vw} < 0.1$,属于弱变异分布状况,而土壤氮素量沿畦长分布的变异系数 C_{Vn} 值在0.136~0.159之间,分布状况属于中等变异,土壤水分空间分布差异明显低于硝态氮。这可能是由于水流进入畦田同时进行水平和垂直运动,田间微地形的变化不仅会影响水流推进,还会影响畦灌性能^[8],造成水氮空间分布不均匀。灌后2 d的土壤平均体积含水率和硝态氮量在畦尾呈现较低的值,这可能由于改水造成畦尾受到的灌溉水量较低,从而导致溶解在水中的氮素量在畦尾部分也相应降低。土壤硝态氮空间分布受多种因素影响,还和灌前肥料在灌前的土壤分布有关,需进行进一步的试验研究。

由方差分析可知,畦宽对于土壤水分沿畦长分布的变异系数(C_{Vw})有显著影响,贡献率达94.36%,对土壤水氮在有效根系层的储存效率和沿畦长分布均匀性无显著影响。任开兴^[21]研究表明,改水距离等要素影响灌水均匀度、灌水效率和储水效率。随着改水距离的增加,灌水效率呈现增大趋势,储水效率呈现减小趋势,灌水均匀度呈现降低趋势。Mohan等^[22]研究表明,过早改水会使畦田尾部受水不足,过迟改水则会引起畦田尾部的积水,在灌水过程中合理的改水距离可以有效地提高灌水效率,减少水资源的浪费。本试验中,改水成数对土壤水分沿畦长分布的变异系数和土壤水氮在有效根系层的储存效率无显著影响,对沿水氮畦长分布均匀性(DU_{wH} 、 DU_{NH} 和 DU_{NQ})尤其是氮素沿畦长分布均匀性有显著影响,贡献率分别为23.9%、91.74%和71.26%。Adamsen等^[23]用Br作为示踪剂来模拟硝态氮在土壤中的运移和分布,研究表明,入畦流量一定的情况下,不同施用时机影响溴化物溶质土壤分布状况,在非砂质土壤条件下,全程施用溴化物具有较好的溶质分布状况,畦灌前半程施用溴化物和全程施用对溴化物溶质分布无明显差异。本试验中,施肥时机仅对 DU_{wH} 和 DU_{NQ} 有显著影响,贡献率为56.09%和27.41%。因此考虑最优水平优先考虑 DU_{wH} 和 DU_{NQ} ,然后考虑 DU_{NH} 和 C_{Vw} ,综合方差分析、因素贡献率和同一因素不同处理差异显著性检验,最优水平组合为A₁B₃C₃,即畦宽为1.5 m、灌溉到畦长1/2时施肥,改水成数为95%的施肥方式,可以达到有利于作物水肥均匀利用吸收的较为均匀的土壤水氮空间分布。

4 结论

1)灌后2 d的土壤水氮空间分布变异系数 C_v 值较灌前2 d呈下降趋势,水氮空间分布得到改善。不同处理下作物有效根系层内氮素储存效率高于水分储存效率,土壤水分沿畦长分布均匀性高于土壤氮素沿畦长分布均匀性。

2)畦宽对于土壤水分沿畦长分布变异系数影响显著,施肥时机和改水成数对水氮沿畦长分布均匀性影响显著,且改水成数对于土壤氮素沿畦长分布均匀性影响大于施肥时机。畦宽为1.5 m,灌溉到畦长1/2时施肥,改水成数为95%的施肥方式下土壤有效根系层内的水氮储存效率和土壤水氮沿畦长分布均匀性较高,形成有助于作物吸收利用的均匀水氮空间分布状况。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部.中国水利年鉴[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [2] 石玉林,卢良恕.中国农业需水与节水高效农业建设[M].北京:中国水利水电出版社,2001.
- [3] 阎常庆,廖梓龙,龙胤慧.畦灌技术研究进展[J].水科学与工程,2012(3):1-4.

- [4] 李久生, 李蓓, 饶敏杰. 地面灌溉技术参数对氮素运移分布影响的研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6):51-55.
- [5] YAN Xiaoyuan, TI Chaopu, VITOUSEK Peter, et al. Fertilizer nitrogen recovery efficiencies in crop production systems of China with and without consideration of the residual effect of nitrogen[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(9):095002
- [6] 梁艳萍, 许迪, 李益农, 等. 畦灌施肥模式对土壤水氮时空分布的影响[J]. 水利学报, 2008, 39(11):1 221-1 228.
- [7] 姚欣, 李金山, 黄修桥, 等. 尊村引黄灌区果树畦田规格优化[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(3):96-102.
- [8] 杨玫, 孙西欢. 畦灌水流特性与灌水效率的田间试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2007, 38(6):543-546.
- [9] 王明辉, 徐宝山, 任晓文. 干旱区夏玉米畦灌灌水技术参数试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7):113-116.
- [10] 白美健, 许迪, 李益农. 不同微地形条件下入渗空间变异对畦灌性能影响分析[J]. 水利学报, 2010, 41(6):732-738.
- [11] 聂卫波, 费良军, 马孝义. 基于土壤入渗参数空间变异性的畦灌灌水质量评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1):100-105.
- [12] 刘懿, 缴锡云, 张仙, 等. 表施肥料条件下畦灌地表水流中氮素质量浓度变化规律[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(5):34-37.
- [13] SANCHEZ C A, FARRELLPOE K L, HUNSAKER D J, et al. Performance indices for surface N fertigation[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2003, 129(3):173-183.
- [14] ABBASI F, ADAMSEN F J, HUNSAKER D J, et al. Effects of flow depth on water flow and solute transport in furrow irrigation: Field data analysis[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2003, 129(4):237-246.
- [15] SHOUSE P, FEYEN J, GENUCHTEN M T V, et al. Overland water flow and solute transport: Model development and field-data analysis[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2003, 129(2):71-81.
- [16] 任建民, 李明顺, 董玉云, 等. 水平畦灌技术参数对灌水质量及春小麦产量影响的试验研究[J]. 水利水电技术, 2010, 41(4):75-77.
- [17] 白美健, 许迪, 李益农, 等. 畦灌撒施与液施硫酸铵地表水流和土壤中氮素时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8):19-24.
- [18] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1992.
- [19] 白美健, 许迪, 李益农. 冬小麦表施尿素畦灌下土壤水氮分布试验研究[J]. 水利学报, 2010, 41(10):1 254-1 260.
- [20] 孙秀路, 黄修桥, 李金山, 等. 波涌灌溉土壤水氮分布的田间试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(1):33-38.
- [21] 任开兴. 丘陵山区波涌沟灌试验及其技术要素优化[D]. 晋中:山西农业大学, 2003.
- [22] MOHAN S, Vijayalakshmi D P. Prediction of irrigation return flows through a hierarchical modeling approach[J]. Agricultural Water Management, 2009, (2):233-246.
- [23] ADAMSEN F J, HUNSAKER D J, PEREA H. Border strip fertigation: effect of injection strategies on the distribution of bromide[J]. Transactions of the Asae, 2005, 48(2): 529-540.

Spatial Distribution of Water and Nitrogen under Different Strip-border Fertigation

GAO Jianmin^{1,2}, LYU Mouchao^{1*}, DENG Zhong¹, LI Ying¹, HU Lan^{1,2}, ZHONG Zhibo^{1,2}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Water-saving Agriculture of Ministry of Agriculture, Xinxiang 453002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract:【Objective】The purpose of this paper is to estimate the optimal geometrical parameters of strip border fertigation of summer corn, as well as the associated spatial distribution of soil water and nitrogen. 【Method】Strip border with three widths - 1.5, 2.3 and 3.2 m - were studied. Fertilization ushered in when the surface water front reached 1/2, 1/3 and 100% of the border length respectively with the inflow of the fertigation cutting off when 85%, 90% and 95% of designed irrigation water was deemed to have flown into the border. The conventional border fertigation was used as the control. 【Result】Spatial soil moisture distribution along the border length was significantly affected by the border width with a contribution rate of 94.36%. Along the same direction, the timing at which the inflow fertigation was cut off also had a significant effect on the uniformity of soil water and nitrogen distribution (DU_{WH} and DU_{NH} , DU_{NO}), particularly the nitrogen distribution, with a contribution rate of 23.9% and 91.74% respectively. Fertilization timing only significant affected DU_{WH} and DU_{NO} , with a contribution rate of 56.09% and 27.41% respectively. 【Conclusion】The spatial soil water and nitrogen distribution can be improved under strip-border fertigation by setting the border width at 1.5 m, and applying the fertilizer when the surface water front reached 1/2 of the border length, followed by cutting off the inflow when 95% of water was deemed to have flown into the border. The results presented in this paper provide a guidance for water and nitrogen management to improve their use efficiency under strip border irrigation/fertigation.

Key words: border irrigation; fertigation; fertilization timing; inflow cutoff; spatial distribution of water and nitrogen

责任编辑:赵宇龙