

畦灌不同施肥模式对夏玉米田间水氮分布的影响

陈新国^{1,2}, 张寄阳^{1,3}, 申孝军^{1,3}, 高 阳^{1,3}, 刘小飞^{1,3}, 吴晓磊^{1,2}, 龚雪文^{1,2}

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002;

2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081; 3. 农业部作物需水与调控重点实验室, 河南 新乡 453002)

摘要: 为了探究夏玉米畦灌条件下适宜的灌溉施肥模式, 在大田试验条件下对不同施肥方式(液施和撒施)、液施不同施肥时机和不同入畦流量下土壤水氮空间分布状况及其变化趋势进行了研究。结果表明, 灌后 2 d 土壤水分空间分布差异明显小于硝态氮, 适当增大入畦流量有助于改善沿畦长方向土壤水分空间分布均匀性。灌后 2 d 不同处理间作物有效根系层土壤硝态氮和土壤水分的贮存效率(土壤有效根系层土壤硝态氮占 0—100 cm 土层中硝态氮的比重)变化都不明显。入畦流量相同时, 液施情况下硝态氮沿畦长分布均匀性(介于 86.1%~96.9%之间)高于撒施(介于 89.3%~89.7%之间)。基于入畦单宽流量为 4 L/(s·m)、灌水至畦长 33% 处时均匀施肥的畦灌施肥模式, 玉米根系层中土壤水氮含量比重较高, 而且土壤水分与土壤硝态氮沿畦长分布均匀性最好, 从而形成了有助于作物吸收的均匀的土壤水氮空间分布状态。

关键词: 畦灌施肥; 撒施; 液施; 入畦流量; 施肥时机; 硝态氮; 空间分布

中图分类号: S275.3; S147.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2016)05-0140-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.024

Effects of Border Strip Fertilization on Soil Water and Nitrogen Distribution in Summer Maize Field

CHEN Xinguo^{1,2}, ZHANG Jiyang^{1,3}, SHEN Xiaojun^{1,3}, GAO Yang^{1,3},
LIU Xiaofei^{1,3}, WU Xiaolei^{1,2}, GONG Xuewen^{1,2}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002; 2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 3. Key Laboratory of Crop Water Regulation, Ministry of Agriculture, Xinxiang, Henan 453002)

Abstract: To explore the optimal model of border strip fertilization for summer maize, the distribution and variation of soil water and nitrate nitrogen in the field with different methods (fertigation and broadcast fertilization), timing and rates of fertilization were investigated. Results showed that 2 days after applying water and fertilizer, the spatial distribution variability of soil water was far less than that of soil nitrate nitrogen, and increasing the inflow rate appropriately could improve the distribution uniformity of soil moisture along length direction. The change of the storage efficiency of soil nitrate nitrogen in the effective root zone of summer maize was not obvious and it was same to soil moisture. Under the same condition of inflow rate, the distribution uniformity of soil nitrate nitrogen along length direction of summer maize with fertigation (between 86.1% and 96.9%) were higher than that with broadcast fertilization (between 89.3% and 89.7%). The border strip fertilization with the inflow rate of 4 L/(s·m) and with applying fertilizer as water advanced at 33% of the border length could produce high proportion of soil water and nitrogen accumulation in the effective root zone and provide optimal distribution uniformity along length direction, then formed a spatial homogeneity distribution of soil water and nitrate nitrogen contribution which was beneficial to crop absorption.

Keywords: border strip fertilization; broadcast fertilization; fertigation; inflow rate; timing of fertilization; nitrate nitrogen; spatial distribution

水肥一体化, 广义的讲就是根据作物需求, 对农田水分和养分进行综合调控和一体化管理, 以水促肥, 以肥调水, 实现水肥耦合, 全面提升农田水肥利用率。具体来讲就是灌溉施肥, 即将肥料溶解在水中, 借助管道灌溉系统, 灌溉与施肥同时进行, 适时适量的满足作物对水分和养分的需求, 实现水肥一体化管理和高效利用。与传统的施肥方法相比, 水肥一体化具有提高水肥利用率、节省劳动力、保证养分均衡供应和减少环境污染等优势^[1]。近年来, 国内外学者对滴灌施肥条件下土壤水肥运移分布规律的研究较多, 李久生等^[2]在 15° 扇柱体土槽中进行滴灌施肥试验, 对不同滴头流量、不同灌水量、不同肥液浓度下的水氮分布情况

收稿日期: 2016-03-21
资助项目: 公益性行业科研专项项目(201503130)
第一作者: 陈新国(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事作物水分生理与高效用水研究。E-mail: chenxinguo28@163.com
通信作者: 张寄阳(1973—), 男, 博士, 研究员, 主要从事作物需水规律方面的研究。E-mail: firizjy@163.com

进行研究,王虎等^[3]用含有硝态氮的肥液进行滴灌施肥试验,研究不同滴头流量、不同灌水施肥量情况下土壤水分和硝态氮的分布规律,Sharmasarkar 等^[4]也进行了类似的滴灌施肥试验研究,结果表明滴灌施肥条件下水分的运动与土壤中硝态氮的运移分布有密切关系。此外,Abbasi 等^[5-7]国外学者对地面灌溉施肥技术也有所研究,我国对水肥一体化技术在地面灌溉中的研究及应用则刚刚起步^[8]。

地面灌溉作为世界上最常见的灌溉方式^[9],在我国的应用面积占总灌溉面积的 95%以上,而且在未来相当长时间内仍将占主导地位^[10]。有研究表明,我国地面灌溉条件下田间灌溉水利用效率为 0.52,肥料利用效率仅为 0.31,因此,研究地面灌溉方式下水肥一体化技术,对提高水肥利用率和肥料在田间的分布均匀性,实现节水节肥尤为重要^[10-11]。常见的地面灌溉施肥方式有 2 种:一种是在灌水之前先将肥料均匀的撒入田间(撒施),一种是将肥与灌溉水充分混合后一同施入田间(液施,即水肥一体化)。畦灌作为目前我国主要的地面灌溉方式,改进畦灌施肥技术具有较大的节水节肥潜力。通过试验研究畦灌水肥一体化技术下土壤中水氮空间分布差异,可以为畦灌水肥高效利用方案提供依据。许多国内外学者对地面灌溉施肥方式下土壤氮素的分布特征进行了研究,分析了入畦(沟)流量^[12]、灌水深度^[12-13]、施肥方法^[14]、土壤入渗^[14,15]等因素对水肥分布均匀性的影响。Abbasi 等^[12]用溴离子模拟硝酸根离子开展施肥时机对溶质空间分布均匀性影响的大田试验研究,通过研究指出,影响肥料分布均匀性的主要因素是土壤初始含水率、入沟流量、土壤的入参与田面糙率以及施肥时机,受肥料溶液浓度和弥散系数的影响较小。

表 1 试验区土层结构类型

土层深度/cm	不同土壤粒径所占比例/%			土壤质地 (国际制)
	粘粒(<0.002 mm)	粉粒(0.002~0.02 mm)	砂粒(0.02~2 mm)	
0—20	4.38	50	45.62	砂土
20—40	3.44	36.85	59.71	砂土
40—60	5.29	41.84	52.87	壤土
60—80	3.84	39.76	56.40	砂土
80—100	5.47	60.74	33.79	砂土

1.2 试验设计

如表 2 所示,选取施肥方式、施肥时机和入畦单宽流量作为玉米畦灌施肥试验处理设计因素,其中施肥方式为畦灌肥料撒施和液施,施肥时机分别为灌溉全程均匀施肥、灌溉至畦长 33%处开始均匀施肥和灌溉至畦长 66%处开始均匀施肥,入畦单宽流量分别为 2, 4,6 L/(s·m),共计 12 个处理,每个处理设计 3 个重复。按照试验设计方案共布置 36 个封闭的畦田,每个畦田规格均为 50 m×2 m,平均地面坡度为 1:1 000。

在夏玉米生长的大喇叭口期进行畦灌施肥试验。各个畦田的灌溉时间以水流推进至畦尾为控制条件,

Perea-Estrada^[14]研究了不同施肥时机、入畦流量和灌水时间对硝酸盐氮素分布的影响,发现较大的入畦流量下在灌水中期进行施肥可以得到较好的施肥和灌水均匀性。白美健等^[16]在冬小麦返青期开展了不同入畦流量下撒施与液施硫酸铵对地表水流和土壤中氮素时空分布影响的试验研究,结果表明,液施在提高施肥均匀性和减少灌溉期间肥料的损失方面优于撒施。以上研究多数是用溴化物代替化肥来模拟氮素在土壤中的运动状况和时空分布规律的,与化肥中氮素产生的效果有所差异^[17]。此外,有关地面灌溉水肥一体化技术在田间的运用也少有提及。

本试验以速溶尿素(含氮量≥46%)为肥料,在夏玉米生长的大喇叭口期开展肥料撒施与液施方式下不同施肥时机、不同入畦流量下的畦灌灌溉施肥试验,分析畦灌灌水施肥技术参数和灌溉方式对农田水氮空间分布及其在作物有效根系层贮存效率的影响,为水肥一体化技术应用于地面灌溉提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

该畦灌施肥试验于 2015 年 6—9 月份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,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),2015 年 6 月 20 日播种,2015 年 10 月 8 日收获。试验区内土壤以砂土、壤土为主,土层结构类型见表 1。土壤干容重在 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。

施用的化肥为尿素,其施用量为 300 kg/hm²,平均灌水量 80 mm。本试验采用 90 mm PVC 管作为田间畦灌系统,在各个入畦口安装阀门,通过调节阀门的开度来调节管道的流量,利用手持式超声波流量计(MIK—2000H)对入畦流量进行实时监测。对于采用液施的畦块,在灌溉全程、灌水至畦长 33%处和灌水至畦长 66%处时,分别利用微型蠕动泵(BT600—2J,YZII25)经硅胶管从放在畦首的储液罐中匀速的抽取事先溶解好的尿素肥液,使肥液随入畦水流匀速的注入畦田(图 1)。试验开始前,先选择与试验地块相邻的畦田做水流推进预试验,分别对不同入畦流量

撒施处理下灌溉水流从畦首、畦长 33% 处和畦长 66% 处推进到畦尾所需时间进行详细记录,而后根据蠕动泵转速下的出流量计算出所需肥液量,在进行液施时分别根据所需肥液量和施肥量(300 kg/hm²)配制肥液,以保证在试验时灌溉水流推进至畦尾时恰好将肥液全部均匀的施入畦田。

表 2 田间试验设计方案

验处理	施肥方式	施肥时机	单宽流量/ (L · s ⁻¹ · m ⁻¹)
T1	撒施	灌溉全程	2
T2		灌溉全程	4
T3		灌溉全程	6
T4	液施	灌溉全程	2
T5		灌溉全程	4
T6		灌溉全程	6
T7		灌水至 33%	2
T8		灌水至 33%	4
T9		灌水至 33%	6
T10		灌水至 66%	2
T11		灌水至 66%	4
T12		灌水至 66%	6

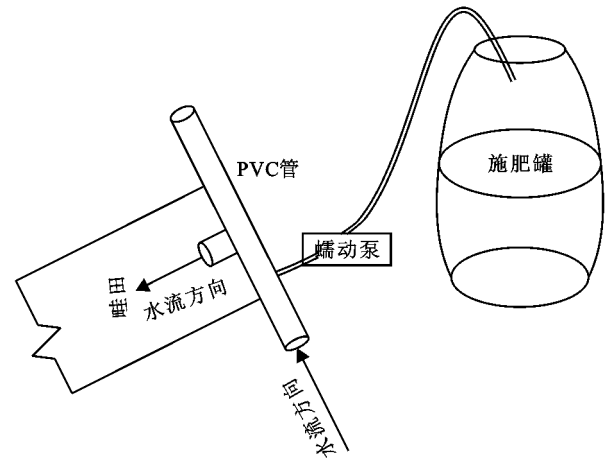


图 1 畦灌施肥方式示意图

1.3 测定项目及方法

在各个试验畦田内,分别沿畦长中心位置依次布置 5 个测点,各个中心测点到畦首的距离分别为 10, 20,30,40,50 m。在玉米畦灌施肥试验灌前及灌后 2 d 取土样,监测各点土壤含水率和土壤含氮量的分布状况。采用土钻取样法在每个畦块各个测点处 0—100 cm 土层剖面获取土样,取样的深度分别为 20,40,60, 80,100 cm。使用烘干法测定土壤含水率,使用紫外可见分光光度计(UV—1200 型)测定土壤中的硝态氮浓度。由于施入土壤中的尿素可迅速转化为铵态氮,继而受硝化作用的影响大部分转化为硝态氮^[11],在实测中土壤铵态氮浓度要远低于土壤硝态氮浓度,故本试验仅对不同畦灌施肥模式下土壤硝态氮和土壤含水量沿畦长空间的分布差异进行分析,在此基础上进行畦灌施肥模式的田间试验评价^[18]。

1.4 评价指标及计算方法

利用 Excel、Surfer 等软件对不同畦灌施肥模式

下的土壤水氮空间分布状况及其差异性进行统计分析,土壤水氮沿畦长空间分布的变异系数 CV 反映其离散状况和空间变异程度,其中 CV≤0.1 为弱变异性,0.1<CV<1 为中等变异性,CV≥1 为强变异性^[19],采用新复极差法对不同畦灌施肥处理下各相关变量数值间的差异在 0.05 水平下进行显著性检验。

畦灌施肥模式性能评价参考白美健等^[20]方法。目前国外用于评价地面灌溉施肥系统性能的指标是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建立的^[17],通过测定灌前与灌后作物根层土壤氮素含量的差异,评价施氮分布均匀性;根据作物根层内的有效施氮量和施入畦田的氮素量之比,评价施氮效率。由于本试验施用的肥料是尿素,撒施的尿素与随水施入的尿素肥液需经一段时间水解后,才能由铵态氮间接的转化为硝态氮,在灌后 2 d 实测到的土壤中的硝态氮并不是由施入的尿素生成的,所以不能采用上述的评价指标来评价施入尿素状况下的施肥灌溉模式性能。在本文中,使用评价指标贮存效率 E_w(%) 和 E_N(%) 来定量描述灌后 2 d 作物有效根系层内(玉米大喇叭口期时的有效根系层为 0—60 cm^[21])土壤水分与土壤硝态氮占 0—100 cm 土层相应值的比重,来反映有效贮存在作物根系层内的土壤水氮状况。

$$E_w = \frac{\overline{X_{RW}}}{\overline{X_W}} \times 100\% \quad E_N = \frac{\overline{X_{RN}}}{\overline{X_N}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\overline{X_N}$ 和 $\overline{X_W}$ 分别为整个畦长 0—100 cm 土层的平均累积硝态氮浓度(mg/L)和体积含水量(%); $\overline{X_{RN}}$ 和 $\overline{X_{RW}}$ 分别为整个畦长作物有效根系层的平均土壤硝态氮浓度(mg/L)和体积含水量(%)。

借助均匀度指标 DU_{WQ}、DU_{WH}、DU_{NQ} 和 DU_{NH} 定量描述灌后 2 d 在 0—100 cm 土层内土壤水分和土壤硝态氮沿畦长空间方向分布的均匀性,

$$DU_{WQ} = \frac{\overline{X_{WQ}}}{\overline{X_{RW}}} \times 100\% \quad DU_{WH} = \frac{\overline{X_{WH}}}{\overline{X_{RW}}} \times 100\% \quad (2)$$

$$DU_{NQ} = \frac{\overline{X_{NQ}}}{\overline{X_{RN}}} \times 100\% \quad DU_{NH} = \frac{\overline{X_{NH}}}{\overline{X_{RN}}} \times 100\% \quad (3)$$

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 0—100 cm 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 0—100 cm 土层内的土壤累积平均硝态氮浓度(mg/L)。

2 结果与分析

2.1 土壤水氮空间分布差异

2.1.1 土壤水分空间分布差异 图 2 和图 3 分别显

示了夏玉米大喇叭口期灌前 2 d 及灌后 2 d 不同施肥灌溉处理下 0—100 cm 土层的土壤平均体积含水量沿畦长空间分布状况,相应的畦田内各点土壤体积含水量在畦田空间分布的变异系数及显著性检验结果见表 3。

与灌水前 2 d 相比(图 2),灌水后 2 d(图 3)土壤含水量高低分布区域与灌水前基本相类似,灌后 2 d 玉米有效根系层(0—60 cm)与 60 cm 以下土层土壤含水量在不同的施肥模式下均有所增加。不同处理下灌前 2 d 土壤平均体积含水量沿畦长空间分布的变异系数 CV 值在 0.15~0.22 之间,分布状况为中等变异性,不同处理之间的 CV 值没有明显差异;而灌后 2 d CV 值在 0.13~0.20 之间,仍为中等变异性。对比表 3 中土壤含水量数

据,可以看出 T5(液施、全程施肥、单宽流量 4 L/(s·m))、T6(液施、全程施肥、单宽流量 6 L/(s·m))、T8(液施、灌溉至畦长 33%处开始施肥、单宽流量 4 L/(s·m))和 T11(液施、灌溉至畦长 66%处施肥、单宽流量 4 L/(s·m))与其他各个处理灌后 2 d 土壤含水量的变异系数有显著差异。在相同施肥方式(液施)、相同施肥时机条件下,随着入畦流量的增大,土壤含水量沿畦长空间分布变异性有减小趋势,表明适当增大入畦流量有助于改善畦长方向土壤水分空间分布均匀性,但变化并不明显,这与灌水前土壤含水量沿畦长空间分布变异性有关,也可能是由于玉米大喇叭口期田间杂草和畦田微地形的影响引起的^[22]。

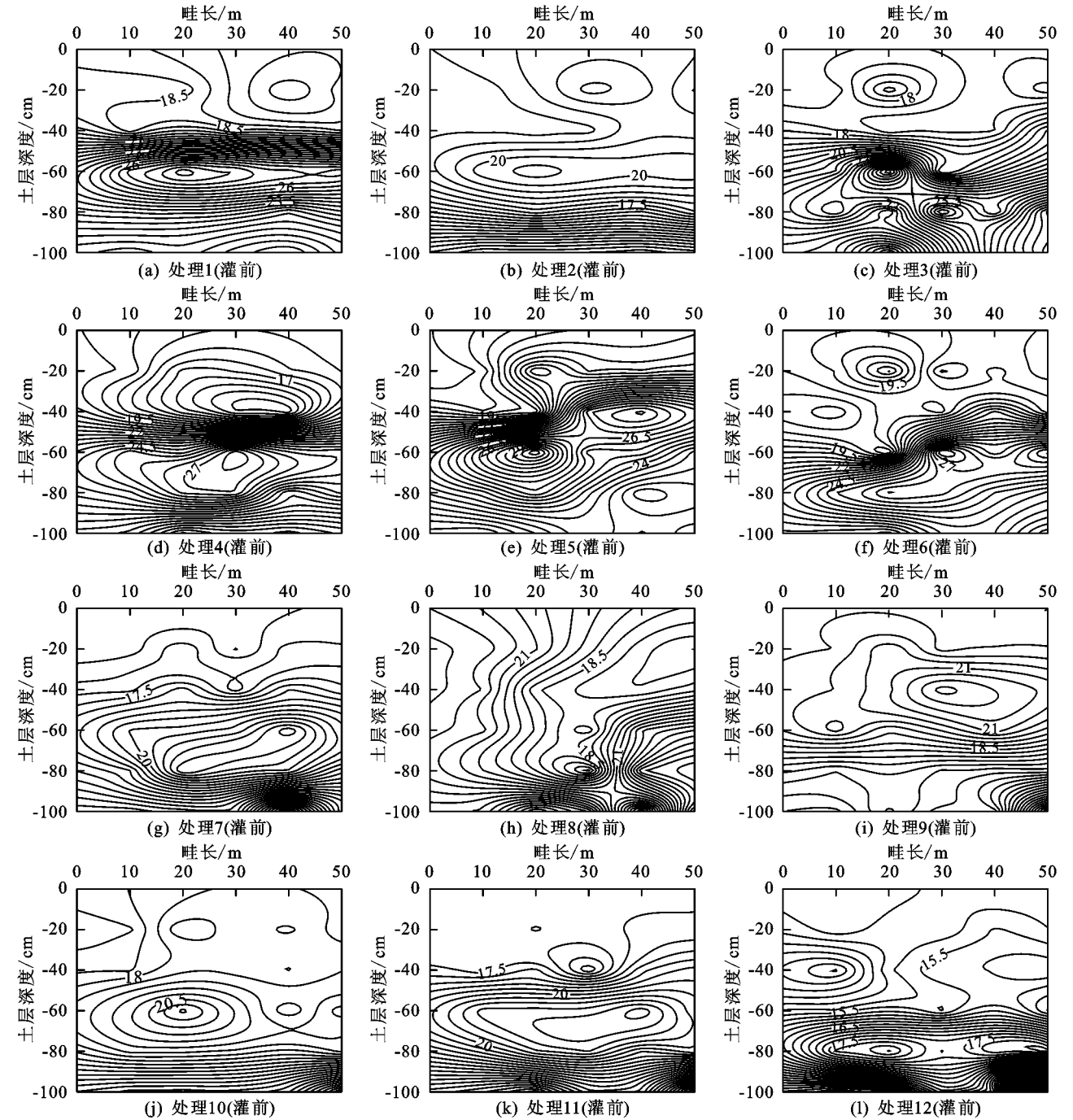


图 2 夏玉米大喇叭口期灌前 2 d 土壤体积含水率空间分布状况

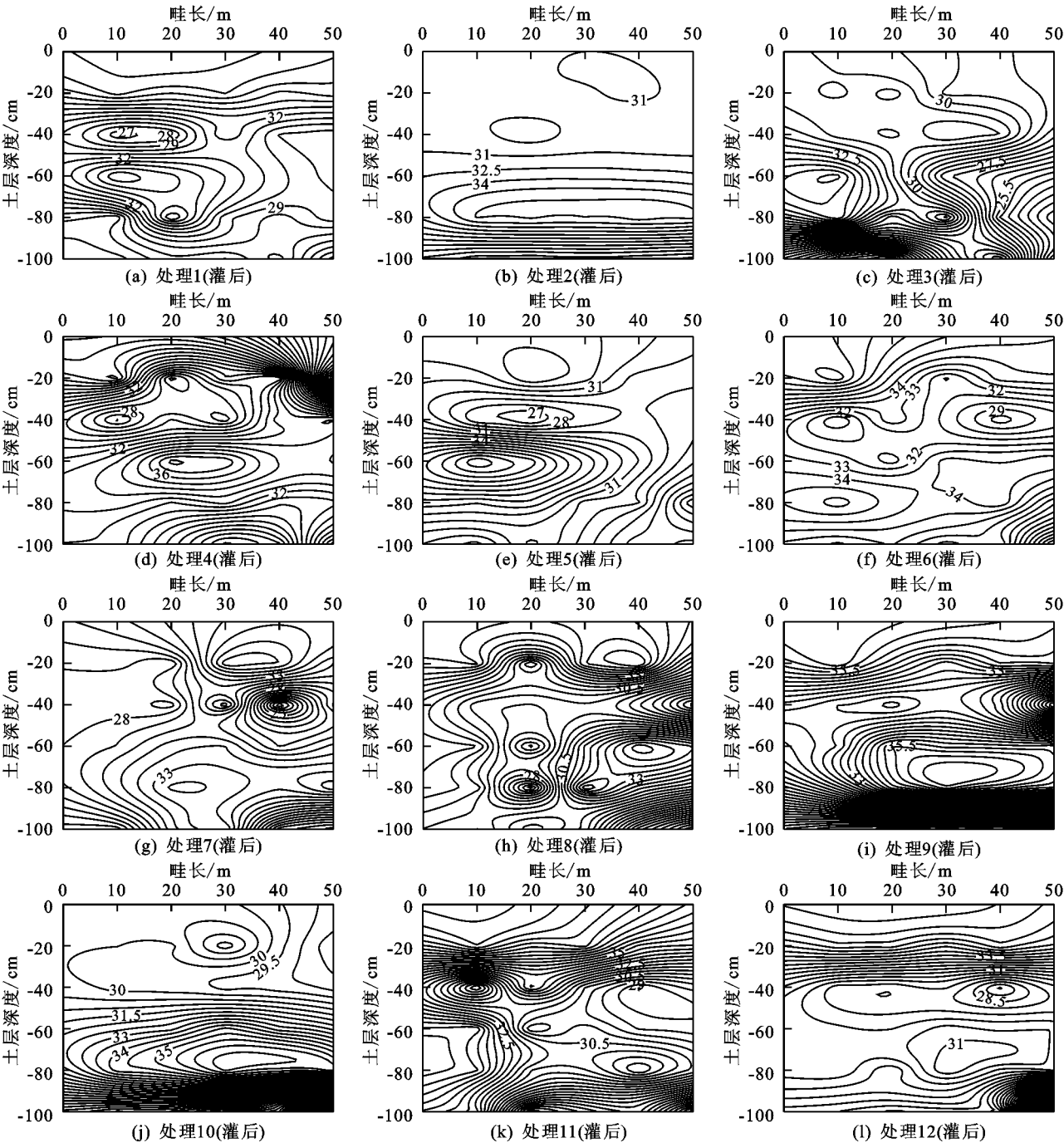


图 3 夏玉米大喇叭口期灌后 2 d 土壤体积含水率空间分布状况

表 3 不同灌水施肥处理下土壤水氮空间分布变异系数

观测项目	观测时间	处理 1	处理 2	处理 3	处理 4	处理 5	处理 6
土壤含水量	灌前 2 d	0.18a	0.20a	0.22a	0.19a	0.15a	0.16a
	灌后 2 d	0.15b	0.18a	0.22a	0.19a	0.15b	0.13b
土壤硝态氮	灌前 2 d	0.56a	0.57a	0.56a	0.54a	0.58a	0.57a
	灌后 2 d	0.51a	0.51a	0.50a	0.47b	0.49b	0.51a
观测项目	观测时间	处理 7	处理 8	处理 9	处理 10	处理 11	处理 12
土壤含水量	灌前 2 d	0.18a	0.16a	0.18a	0.20a	0.17a	0.18a
	灌后 2 d	0.18a	0.13b	0.19a	0.20a	0.15b	0.18a
土壤硝态氮	灌前 2 d	0.57a	0.55a	0.54a	0.59a	0.59a	0.61a
	灌后 2 d	0.51a	0.44c	0.49b	0.50a	0.50a	0.51a

注:数字后面的字母表示变量在各个处理间的显著性,若字母相同,表明差异不显著,字母不同则表明差异显著。

2.1.2 土壤硝态氮空间分布差异 图 4 和图 5 分别显示了夏玉米大喇叭口期灌前 2 d 及灌后 2 d 不同灌溉施肥处理下 0—100 cm 土层的土壤硝态氮浓度沿

畦长空间分布状况,相应的畦田内各测点土壤硝态氮浓度在畦田的空间分布变异系数及显著性检验结果见表 3。

对比图 4 和图 5 可知,灌前 2 d 沿畦长方向土壤硝态氮分布不均匀,具有较大的空间变异性;各个土层土壤硝态氮的含量相差不大。灌后 2 d 沿畦长方向土壤硝态氮分布均匀性明显变好;在 0—100 cm 土层中土壤硝态氮浓度都有所增加,0—40 cm 土层硝态氮含量较灌前 2 d 有明显增加,40 cm 土层以下变化不明显。对比表 3 中土壤硝态氮数据,可以看出不同处理下灌前 2 d 土壤硝态氮浓度在畦田空间分布

的变异系数 CV 值在 0.54~0.61 之间,为中等变异性,不同处理之间 CV 值差异不显著;而灌后 2 d CV 值在 0.44~0.51 之间,也为中等变异性;灌水后 2 d 土壤硝态氮的变异性较灌水前 2 d 减小,但对其空间分布变异性并没有产生太大的影响。主要原因是在灌水施肥前,土壤中固有的硝态氮沿畦长方向在田间的分布就存在变异性,而且在灌水过程中水流运动、田间杂草和微地形也会对其产生影响。

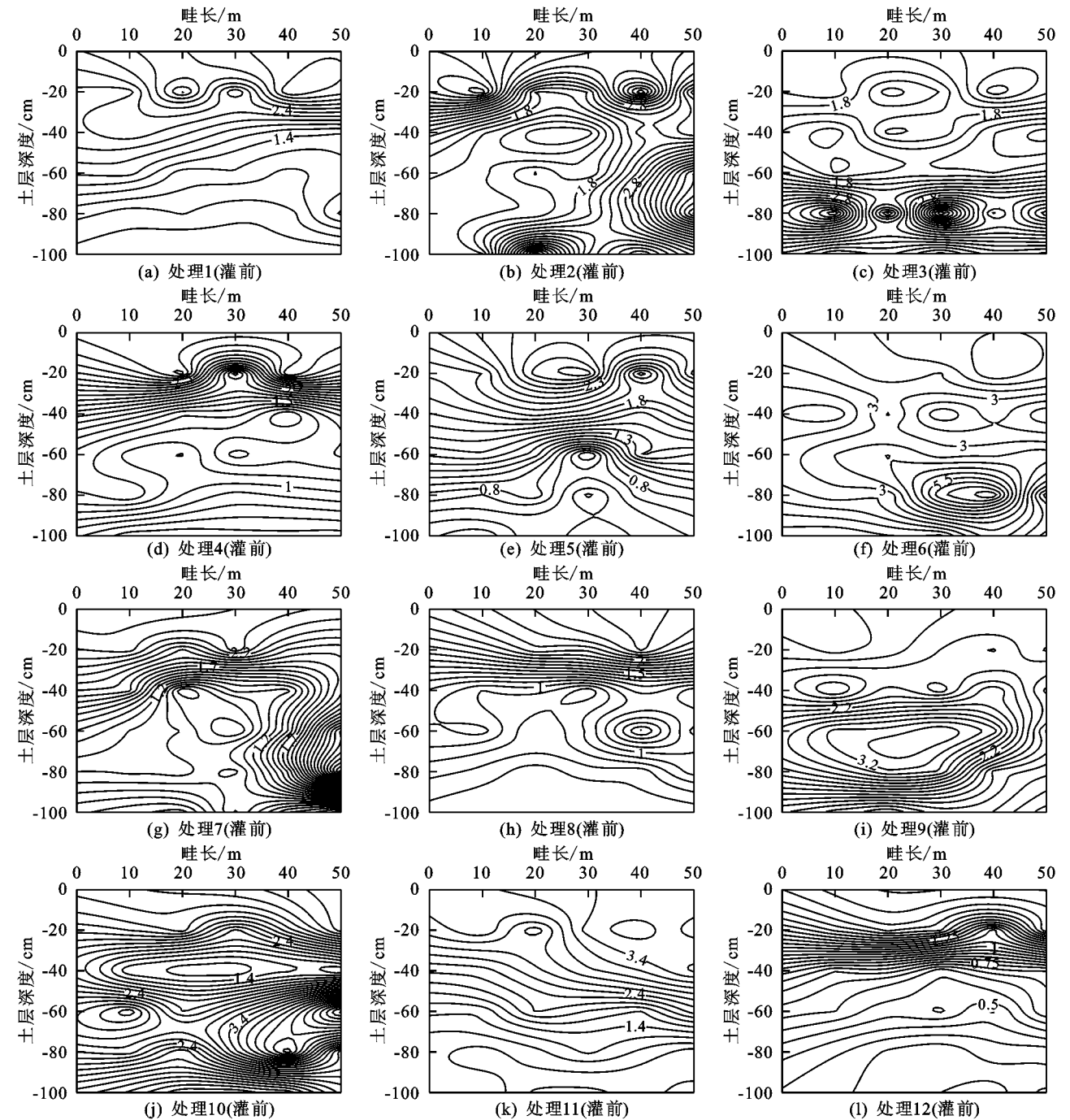


图 4 夏玉米大喇叭口期灌前 2 d 土壤硝态氮空间分布状况

2.2 畦灌施肥模式性能评价

2.2.1 作物有效根系层土壤水氮贮存效率 表 4 给出的研究表明,玉米大喇叭口期灌后 2 d 不同施肥方式(撒施、液施)、不同施肥时机(全程施肥、灌水至 33%处

施肥、灌水至 66%处施肥)以及不同入畦单宽流量(2,4,6 L/(s·m))下的 E_w 值在 60.5%~64.7%之间,不同处理之间的 E_w 值无显著性差异; E_N 值在 67.3%~78.5%之间,不同处理之间 E_N 值变化规律不明显。这说明畦灌施

肥模式差别对 E_w (贮存在玉米有效根系层内的土壤水分占 0—100 cm 土层中土壤水分的比重) 不产生明显影响, 对 E_N 的影响变化也不明显。这可能与本次灌水时灌水量不大 (80 mm), 没有产生深层渗漏有关。总体而言, 同

种处理下, 灌后 2 d 土壤硝态氮在作物有效根系层的贮存效率高于土壤水分的贮存效率; 液施 (T4 到 T12) 处理下氮素的贮存效率 E_N 略高于撒施 (T1 到 T3), 这可能是与撒施的尿素在田面挥发有关。

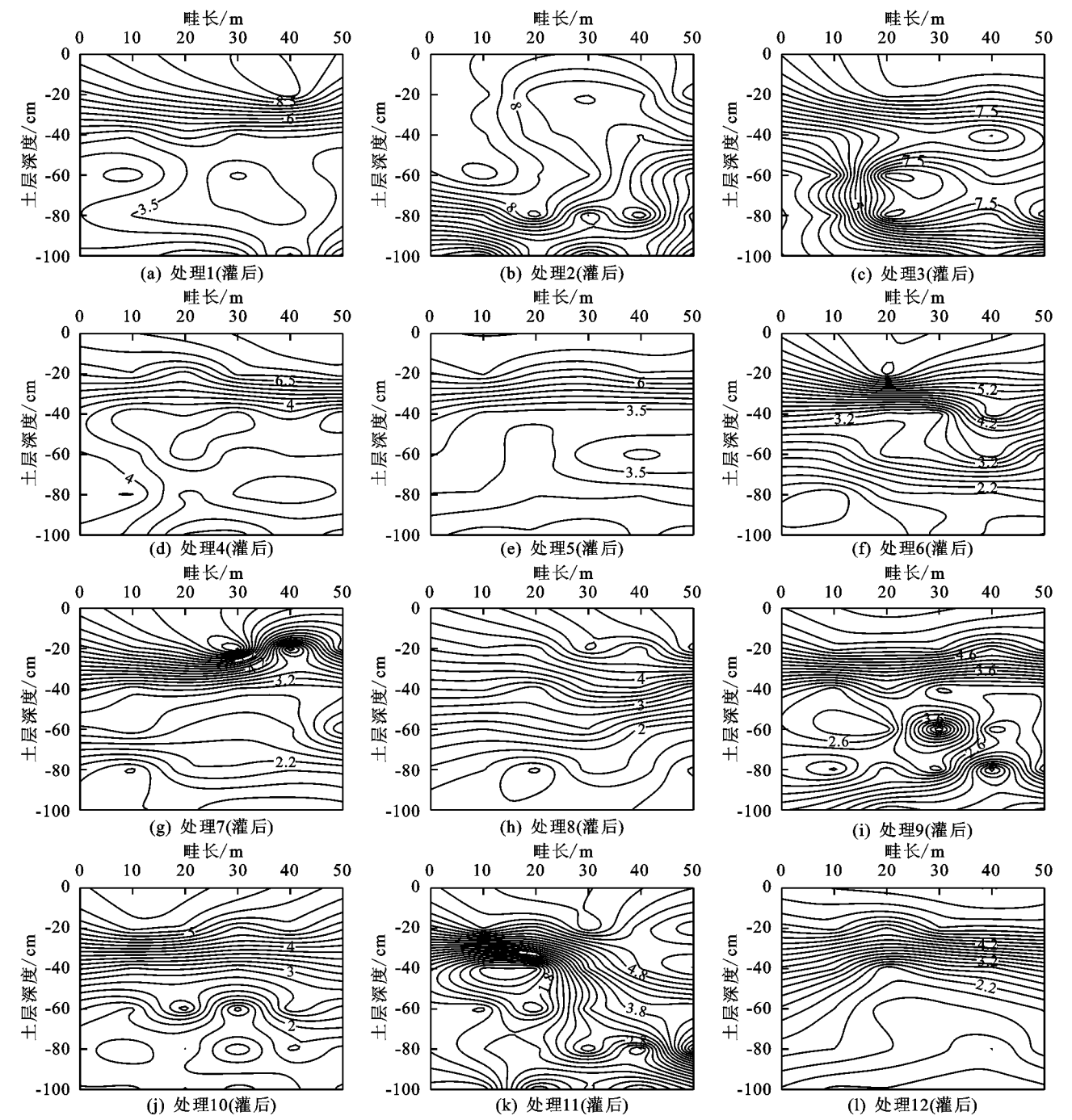


图 5 夏玉米大喇叭口期灌后 2 d 土壤硝态氮空间分布状况

2.2.2 土壤水氮沿畦长空间分布均匀性 表 4 给出的结果还表明, 玉米大喇叭口期灌后 2 d 不同施肥畦灌处理下的 DU_{wQ} 值在 83.6%~98.7% 之间, DU_{wH} 值在 92.1%~96.9% 之间, DU_{NQ} 值在 56.1%~92.2% 之间, DU_{NH} 值在 86.1%~96.9% 之间, 不同处理土壤水分沿畦长分布均匀性值变化波动小于土壤硝态氮。分析表明, 在相同施肥方式、相同施肥时机下, 适当的增加入畦流量, 土壤水分沿畦长方向分布均匀性增

加。液施 (T4 到 T12) 情况下硝态氮沿畦长分布均匀性明显高于撒施 (T1 到 T3) 情况下硝态氮沿畦长分布均匀性。相同施肥方式、相同施肥时机下, 除了前 3 个处理 (T1 到 T3, 撒施) 与后 3 个处理 (T10 到 T12, 灌水至畦长 66% 处开始施肥) 变化不明显外, 其余处理中入畦流量为 4 L/(s·m) 时水氮沿畦长分布的均匀性优于入畦流量为 2 L/(s·m) 和 6 L/(s·m) 时水氮沿畦长分布均匀性。相同施肥方式 (液施)、相同

入畦流量下,当灌水至畦长 33%处施肥(T7,T8 和 T9)时土壤水分与土壤硝态氮沿畦长分布均匀性较高,其次是灌水全程施肥,最后是灌水至畦长 66%处时施肥。总体而言,当入畦单宽流量为 4 L/(s·m)、灌水至畦长 33%处施肥(T8)时,土壤水分与土壤硝态氮沿畦长分布均匀性最好。

综上所述,在以上 12 个处理中,基于入畦单宽流

量为 4 L/(s·m)、灌水至畦长 33%处时均匀施肥的畦灌施肥模式下,玉米有效根系层的土壤水氮比重积累较高(E_w 和 E_N 分别为 61.7%和 77.9%),而且土壤水分与土壤硝态氮沿畦长分布均匀性最好(DU_{wQ} 、 DU_{wH} 、 DU_{NQ} 、 DU_{NH} 依次为 98.7%,96.9%,91.0%和 95.2%),从而形成了有助于作物吸收的均匀的土壤水氮空间分布状态。

表 4 不同畦灌施肥模式性能田间评价结果

评价指标	处理 1	处理 2	处理 3	处理 4	处理 5	处理 6	处理 7	处理 8	处理 9	处理 10	处理 11	处理 12
$E_w/\%$	64.7a	61.7a	61.4a	62.4a	62.2a	63.8a	60.5a	61.7a	62.1a	64.7a	63.0a	63.8a
$E_N/\%$	72.2b	70.9b	73.3b	67.3c	75.1a	78.5a	76.2a	77.9a	73.3b	76.1a	70.7b	75.7a
$DU_{wQ}/\%$	83.6c	93.6b	91.8b	94.5a	87.6c	94.5a	91.1b	98.7a	90.6b	96.6a	92.9b	88.8c
$DU_{wH}/\%$	92.1b	96.7a	96.9a	94.6b	94.9a	96.9a	94.1b	96.9a	94.2b	92.5b	96.6a	92.4b
$DU_{NQ}/\%$	86.4b	56.1d	76.2c	81.8b	92.2a	87.3b	80.0b	91.0a	75.9c	84.8b	64.1d	88.7b
$DU_{NH}/\%$	89.3a	89.5b	89.7b	93.3a	96.9a	95.4a	94.9a	95.2a	91.7a	94.3a	86.1b	94.6a

注:数字后面的字母表示变量在各个处理间的显著性,若字母相同,表明差异不显著,字母不同则表明差异显著。

3 讨论

地面灌溉是目前我国主要的灌溉方式,为满足节水、节肥的需要,地面灌溉水肥一体化技术亟待发展^[23]。已有研究表明,与传统的施肥方法(撒施)相比,液施(水肥一体化)在提高施肥均匀性和减少灌溉期间肥料的损失方面优于撒施^[16]。在本试验中,T1 到 T3(撒施)作物有效根系层的土壤硝态氮在 0—100 cm 土层的贮存效率依次为 72.2%,70.9%和 73.3%,T4 到 T12(液施)作物有效根系层的土壤硝态氮在 0—100 cm 土层的贮存效率依次为 67.3%,75.1%,78.5%,76.2%,77.9%,73.3%,76.1%,70.7%和 75.7%,T1 到 T3(撒施)与 T4 到 T12(液施)的研究结果对比分析表明,各个处理之间土壤硝态氮的贮存效率变化并不明显,但液施情况下硝态氮沿畦长方向具有最低值 1/4 和 1/2 畦段的均匀度 DU_{NQ} 和 DU_{NH} 优于撒施。

土壤中水与溶质的分布状况是评价地面灌溉水肥一体化技术的重要指标。本试验的研究结果表明,灌后 2 d 土壤水氮空间分布状况为中等变异性,土壤水分与土壤硝态氮在各个土层都有所增加,土壤水分空间分布差异明显小于硝态氮。灌后 2 d 作物有效根系层土壤硝态氮的贮存效率介于 67.3%~78.5%之间,高于土壤水分的贮存效率,而同一处理下沿畦长方向分布均匀性则是土壤水分(DU_{wQ} 和 DU_{wH} 分别介于 83.6%~98.7%之间和 92.1%~96.9%之间)好于土壤硝态氮(DU_{NQ} 和 DU_{NH} 分别介于 56.1%~92.2%之间和 86.1%~96.9%之间)。白美健等^[20]以入畦单宽流量和施肥量为设计因素在表施尿素畦灌下对土壤水氮分布进行研究,也得到类似的结果,即灌后 2 d 土壤水分空间分布差异明显小于土壤硝态氮,作物有效根系层土壤硝态氮贮存效率明显高于土壤水分,沿畦长方向分布均匀性则是土壤水分明显好于土壤硝态氮。这可能是由于灌水前土壤中固有的硝态氮贮存效率较土壤水分高,而土壤水分分布均匀性较土壤硝

态氮好,导致灌水后土壤硝态氮的贮存效率较高,而土壤水分的分布均匀性较好;另外,土壤中的铵态氮也会通过硝化作用转化为硝态氮,从而使土壤中硝态氮含量增加^[11]。

在研究地面灌溉水肥一体化时,讨论施肥时机和入畦流量对土壤中水分和溶质分布的影响对提高水肥利用率有指导意义。Adamse 等^[24]人用溴化物代替硝酸盐,在给定的入畦流量下,在非砂质土壤上对灌溉期间 4 种施肥时机(全程施肥,前 1/2,中间 1/2 和后 1/2 施肥)下溴化物溶质的土壤分布状况进行了比较,研究表明,在畦灌全程施用溴化物情况下能够获得最佳的溶质分布状况,而在畦灌前半程注入溴化物得到的结果与全程施用溴化物相比,没有明显差异。梁艳萍等^[25]探究了不同入畦流量(2 L/(s·m)和 4 L/(s·m))和不同施肥时机下(灌溉全程施肥和灌溉后半程施肥)沿畦长土壤水氮空间分布差异,指出入畦单宽流量为 4 L/(s·m)和灌溉全程施肥运行方式下可以形成相对较高的土壤水氮空间分布均匀性。对比分析本次试验相同施肥方式、相同入畦流量、不同施肥时机下的土壤水氮分布状况,灌水至畦长 33%处施肥时土壤水氮沿畦长分布均匀性较高,但变化不明显,这可能是由于田间微地形变化和田间杂草引起的。畦田中的水流同时参与沿畦面方向的水平运动和垂直于畦面的入渗 2 个运动,在灌溉水流推进过程中,田面的微地形变化(凹坑或凸坡)会阻碍或滞留灌溉水流的推进,导致土壤中水氮分布均匀性降低^[26];再者由于畦田中杂草分布不均,也会阻碍灌溉水流的推进,同时杂草对水分和氮素的不均匀吸收也是引起水氮分布不均的原因。

地面灌溉中水分和氮素的分布受到多种因素的影响^[9],地面灌溉技术参数对水分和氮素的运移、分布的影响是重要的。由于地面灌溉条件下水分与氮素的运移分布是一个复杂的过程,仅仅通过大田试验来确定这些参数的影响是不够的,还需要建立合适的水分和

溶质运移模型对地面灌溉中水分和溶质的分布进行模拟,进一步确定各个参数对水氮运移的影响。

4 结论

(1)本试验的试验结果表明,灌水后2 d土壤水分空间分布变异系数在0.13~0.20之间,而土壤硝态氮的空间分布变异系数在0.44~0.51之间,土壤水分的空间分布差异性小于土壤硝态氮,土壤水氮的空间分布受到施肥方式、施肥时机和入畦流量等因素的影响。

(2)灌水后2 d作物有效根层土壤水分的贮存效率在60.5%~64.7%之间,而土壤硝态氮的贮存效率在67.3%~78.5%之间,土壤硝态氮的贮存效率高于土壤水分的贮存效率;不同处理之间作物有效根层土壤水分和土壤硝态氮的贮存效率没有明显差异。

(3)在相同施肥方式、相同施肥时机下,适当的增加入畦流量,土壤水分沿畦长方向分布均匀性增加。液施(T4到T12)情况下土壤硝态氮沿畦长分布均匀性高于撒施(T1到T3)情况下土壤硝态氮沿畦长方向的分布均匀性。相同施肥方式(液施)、相同入畦流量下,当灌水至畦长33%处施肥时土壤水分与土壤硝态氮沿畦长分布均匀性较高。

(4)本试验条件下,基于入畦单宽流量为4 L/(s·m)、灌水至畦长33%处时均匀施肥的畦灌施肥模式,玉米有效根系层的土壤水氮比重积累较高(E_w 和 E_N 分别为61.7%和77.9%),而且土壤水分与土壤硝态氮沿畦长分布均匀性最好(DU_{wQ} 、 DU_{wH} 、 DU_{nQ} 、 DU_{nH} 依次为98.7%、96.9%、91.0%和95.2%),从而形成了有助于作物吸收的均匀的土壤水氮空间分布状态。

参考文献:

- [1] 高祥照,杜森,钟永红,等.水肥一体化发展现状与展望[J].中国农业信息,2015(4):14-19.
- [2] 张建君,李久生,任理.滴灌施肥灌溉条件下土壤水氮运移的研究进展[J].灌溉排水学报,2002,21(2):75-78.
- [3] 王虎,王旭东,赵世伟.滴灌施肥条件下土壤水分和速效氮的分布规律[J].西北农业学报,2008,17(6):309-314.
- [4] Sharmasarkar F C, Sharmasarkar S, Miller S D, et al. Assessment of drip and flood irrigation on water and fertilizer use efficiencies for sugarbeets[J]. Agricultural Water Management, 2001, 46(3): 241-251.
- [5] 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 and Drainage Engineering, 2003, 129(4): 237-245.
- [6] Burguete J, Zapata N, Garcia-Navarro P, et al. Fertigation in furrows and level furrow systems. II: Field experiments, model calibration, and practical applications[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2009, 135(4): 413-420.
- [7] Crevoisier D, Popova Z, Maihol J C, et al. Assessment and simulation of water and nitrogen transfer under furrow irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(4): 354-366.
- [8] 李久生,李蓓,饶敏杰.喷灌施肥灌溉均匀性对土壤硝态氮空间分布影响的田间试验研究[J].农业工程学报,2004,20(6):51-55.
- [9] Ebrahimian H, Keshavarz M R, Playan E. Surface fertigation: a review, gaps and needs[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2014, 12(3): 820-837.
- [10] 李益农.我国地面灌溉技术评价及其发展趋势[C]//中国水利学会.中国水利学会首届青年科技论坛论文集.北京:中国水利水电出版社,2004:201-207.
- [11] 朱兆良,文启孝.中国土壤氮素[M].南京:江苏科技出版社,1992:228-229.
- [12] Abbasi F, Simunek J, Van Genuchten M, et al. Overland water flow and solute transport: model development and field-data analysis[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(2): 71-81.
- [13] Ebrahimian H, Liaghat A, Parsinejad M, et al. Distribution and loss of water and nitrate under alternate and conventional furrow fertigation[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2012, 10(3): 849-863.
- [14] Perea-Estrada H. Development, verification and evaluation of a solute transport model in surface irrigation[D]. Tucson, Arizona, USA: The University of Arizona, 2005.
- [15] Sabillon G N, Merkley G P. Fertigation guidelines for furrow irrigation[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2004, 2(4): 576-587.
- [16] 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.
- [17] Zerihun D, Sanchez C A, Farrell-Poe K L, et al. Performance indices for surface N fertigation[J]. Journal of irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(4): 173-184.
- [18] 栗岩峰,李久生,李蓓.滴灌系统运行方式和施肥频率对番茄根区土壤氮素动态的影响[J].水利学报,2007,38(7):857-865.
- [19] 孙秀路.施肥条件下波涌灌溉田间水氮分布特性研究[D].北京:中国农业科学院,2015.
- [20] 白美健,许迪,李益农.冬小麦麦施尿素畦灌下土壤水氮分布试验研究[J].水利学报,2010,41(10):1254-1260.
- [21] 龚振平,邵孝侯,张富仓,等.土壤学与农作学[M].北京:中国水利水电出版社,2009:259-264.
- [22] 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.
- [23] 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):1221-1228.
- [24] 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.
- [25] 梁艳萍,许迪,李益农,等.冬小麦不同畦灌施肥模式水氮分布田间试验[J].农业工程学报,2009,25(3):22-27.
- [26] 魏茅.灌区农田水氮运移机理及其数值模拟研究[D].西安:长安大学,2014.