植物营养与肥料学报 2015,21(4): 927 -935 doi: 10.11674/zwyf.2015.0411
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

滴灌施肥对冬小麦农田土壤 NO_3^--N 分布、累积及氮素平衡的影响

陈 静[1,2], 王迎春[1*], 李 虎[1], 王立刚[1], 邱建军[1*], 肖碧林[1]

(1 中国农科院农业资源与农业区划研究所,北京 100081; 2 北京农业信息技术研究中心,北京 100097)

摘要:【目的】黄淮海平原高产麦田水肥资源的大量投入带来了水肥利用率低、氮素损失量大等一系列问题,本文研究了滴灌施肥对黄淮海平原冬小麦大田氮素利用和损失的影响,以期为小麦高产高效施肥提供新的技术手段。**【方法】**以尿素、$NH_4H_2PO_4$ 和 KCl 混合的水溶性肥料为材料,在山东桓台进行冬小麦主要生育期测墒补灌并随水施肥的田间试验,设置 4 个施氮量处理,即 N0(不施肥)、N1(94.5 kg/hm^2)、N2(189 kg/hm^2)和 N3(270 kg/hm^2),分析了大田土壤 NO_3^--N 空间分布、剖面累积及氮素的平衡。**【结果】**1)滴灌施肥 24 h 后,随施氮量的增加,在滴头周围水平方向上土壤 NO_3^--N 从在湿润土体边缘聚集逐渐变化为在滴头下方聚集,当施氮量为 189 kg/hm^2 时,滴灌施肥后滴头下方和湿润土体边缘的 NO_3^--N 含量差异不显著,在滴头周围水平方向上均匀性最好; NO_3^--N 在滴头下方土壤内随水运移深度主要在 60 cm 以上,滴灌施肥后滴头下方垂直方向上 NO_3^--N 没有在湿润体边缘聚集。2)冬小麦收获后,0—100 cm 土壤剖面 NO_3^--N 累积量随施氮量的增加而逐渐增加,且施氮量超过 N 189 kg/hm^2 后,土壤剖面 NO_3^--N 累积量的增加幅度加大,0—40 cm 土层的 NO_3^--N 增加量显著高于其他土层,N0、N1、N2 和 N3 处理 0—40 cm 土层 NO_3^--N 累积量所占比例分别为 66%、72%、72% 和 71%。3)随着施氮量的增加,冬小麦吸氮量和籽粒产量先增加后下降,而 0—100 cm 土层氮素残留量、表观损失量不断增加,滴灌施肥条件下氮素表观损失量较低,N1、N2 和 N3 的表观损失率分别为 20%、17% 和 16%。**【结论】**滴灌施肥措施下,合理的灌溉量可以调节滴灌施肥后硝态氮主要向下运移至作物根区范围,集中在作物根系最密集的 0—40 cm 范围内,肥液浓度对硝态氮运移深度影响不大。施入适宜量氮肥有利于提高滴头下方湿润体内水平方向上 NO_3^--N 分布的均匀度,从而促进作物对氮素的吸收。施氮量为 189 kg/hm^2 的 N2 处理获得了最高的籽粒产量和氮肥利用效率,播前和收获后根区土壤 NO_3^--N 累积量基本达到平衡,是试验筛选出的最佳滴灌施氮模式。

关键词: 冬小麦; 滴灌施肥; NO_3^--N; 空间分布; 氮素平衡

中图分类号: S275.6; S512.1$^+$1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)04-0927-09

Characteristics soil nitrate nitrogen distribution, accumulation and nitrogen balance in winter wheat field under drip fertigation

CHEN Jing[1,2], WANG Ying-chun[1*], LI Hu[1], WANG Li-gang[1], QIU Jian-jun[1*], XIAO Bi-lin[1]

(*1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*; *2 Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 10097, China*)

Abstract:【Objectives】 We studied the NO_3^--N spatial distribution and accumulated principle in winter wheat farmland soil, aiming to reduce the N loses and improve the integrated efficiency of drip fertigation system. **【Methods】** Urea, $NH_4H_2PO_4$ and KCl mixed to make liquid fertilizer. A filed experiment was carried at in Shandong Province, adopting the methods of recharge and fertilization by measuring soil moisture during the winter wheat growth season. Four treatments including no fertilizer(N0), 94.5 kg/hm^2(N1),189 kg/hm^2(N2) and 270 kg/hm^2(N3) of N fertilizer rates were set up, the NO_3^--N spatial distribution, profile accumulation and nitrogen

收稿日期: 2014-04-11 **接受日期:** 2015-03-17 **网络出版日期:** 2015-05-08

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203012-4-4, 201103039)资助。

作者简介: 陈静(1982—),女,江西玉山人,博士,主要从事农业环境生态研究。E-mail: chenj@nercita.org.cn

* 通信作者 E-mail: wangyingchun@caas.net.cn

balance were investigated.【**Results**】1) After 24 h of drip irrigation, with the increased of nitrogen application, the NO_3^--N in soil at the horizontal direction of water dropper aggregated from moist soil edge to water dropper downward. When the nitrogen application was 189 kg/hm^2 the NO_3^--N in soil that beneath water dropper and moist soil edge had no significant difference after drip fertigation. The horizontal direction around the water dropper has the best uniformity, the NO_3^--N under water dropper was mostly above 60 cm, the NO_3^--N in soil at the vertical direction was not concentrated at the moist soil edge. 2) After harvest, the accumulation of NO_3^--N increased with nitrogen application at 0-100 cm soil layer and when nitrogen application above N 189 kg/hm^2, the accumulation became larger, and the increase in 0-40 cm was higher than in other soil layers, the accumulation at 0-40 cm was respectively 66%, 72%, 72% and 71% in N0, N1, N2 and N3 treatment. 3) With the increased of nitrogen application, the winter wheat nitrogen uptake and grain yield was increased at first then descended, however, the amount of residue and apparent loses of NO_3^--N was increasing, apparent N loses was lower when drip irrigation, the apparent loses rate of N1, N2 and N3 was 20%, 17% and 16%.【**Conclusions**】Through drip fertigation, the rational drip irrigation could adjust nitrate nitrogen to transfer to the root area and concentrated on the 0-40 cm soil layer, the fertilizer concentration have little impact on the depth that nitrate nitrogen transferred. The suitable amount of nitrogen fertilizer will benefit to the distribution uniformity of NO_3^--N in the horizontal direction of moist soil under the water dropper to promote the absorption of N. When the N application is 189 kg/hm^2, the highest grain yield and N use efficiency can be achieved, the NO_3^--N in soil around root area accumulated amount was basically balanced, and could be the best drip fertigation model that be selected.

Key words: winter wheat; drip fertigation; NO_3^--N; distribution; nitrogen balance

如何提高化肥利用率已引起人们的高度重视，好的施肥措施应为作物根区持续、适量供应养分，滴灌施肥技术无疑是达到这一目的理想灌溉施肥方式[1]。与传统的施肥方法相比，滴灌施肥的显著特点是可以将水肥通过滴灌系统直接输送到作物根区附近，使水分和养分在土壤中均匀分布，以保证养分被根系快速吸收[2]。在一般条件下滴灌施肥可以获得相当或更高的作物产量，同时可以提高肥料利用效率50%以上[3]。滴灌施肥技术目前主要应用在果树和经济作物上，但是随着粮食安全、水资源短缺、农业面源污染等问题的日益严峻，在粮食作物上的应用也逐渐成为趋势。据估计到2015年，中国将新增玉米水肥一体化技术应用面积100万公顷，小麦33.3万公顷[4]。然而滴灌施肥条件下氮素在土壤中的运移规律非常复杂，存在转化、吸收和吸附等过程，受土壤性质、滴头流量溶液浓度、肥料类型、施肥历时等多种因素的影响。如李久生等进行室内滴灌施肥模拟研究表明，灌水结束后湿润体边缘有NO_3^--N累积的现象[5-7]；Haynes[8]和杨梦娇等[9]利用尿素溶液进行的滴灌施肥田间试验的结果则表明，滴灌施肥后NO_3^--N主要聚集在滴头下方，不存在湿润土体边缘聚集的现象。Blaine等[10]应用HYDRUS-2D模型模拟了尿素、铵和硝酸盐三种肥料进行滴灌施肥后在土壤中的运移情况，结果显示滴灌施肥后尿素横向稍有扩散，随着时间推移由于水解作用浓度逐渐降低，铵由于土壤吸附作用聚集在滴头周围，而硝酸盐没有被土壤吸附，且反硝化作用可忽略不计，滴灌施肥后一直向下运移。Haynes[8]的大田试验和习金根等[11]的室内土柱模拟结果相似，不同肥料类型显著影响土壤内氮素的运移规律，滴灌施肥后氮素向下运移的深度是硝态氮肥>尿素>铵态氮肥。Hajrasuliha等[12]用^{15}N标记肥料，表明肥料为铵态氮时氮素向下运动到150 cm；而肥料为硝态氮时氮素可以向下运移至210—240 cm。因此研究滴灌施肥条件下NO_3^--N的空间分布和累积规律不仅能减少NO_3^--N的损失，提高滴灌施肥系统效率[13]，而且对于粮食生产、环境保护和节约资源都具有非常重要的现实意义。

黄淮海平原是典型的冬小麦/夏玉米轮作区，属暖温带半湿润大陆季风气候区。由于冬小麦生长季节干旱少雨，为了获得可观的产量，高产麦田往往需要大量补充灌水。水肥资源的大量投入带来了一系列的问题，如水肥利用率低、氮素损失量大等[14]。为了系统研究滴灌施肥措施下滴施后氮素在土壤中的运移规律、氮素利用效率和氮平衡，笔者在山东冬小麦大田内进行了滴灌施肥试验，以期为提高滴灌施肥系统的综合效率提供数据支持。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

本试验于 2012～2013 年在山东省桓台县新城镇逯家村中国农业大学试验基地进行。地理位置处于北纬 36°57′30″,东经 117°58′15″,该地区属半干旱半湿润暖温带大陆性季风气候,2012～2013 年小麦季试验区降水量 149.8 mm,与该地区平水年相近。试验区主要种植制度为冬小麦/夏玉米轮作,本试验在已连续多年实施免耕和秸秆还田管理的冬小麦/夏玉米轮作农田上进行。供试农田土壤质地为粉壤土,土壤其他基础理化性质见表 1。

表 1　试验地基础土壤理化性质

Table 1　Soil physical-chemical proprieties of experimental plots

土壤层次 Soil layer (cm)	有机质 Organic matter (g/kg)	有效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)	田间持水量 Field capacity (cm^3/cm^3)	容重 Bulk density (g/cm^3)	土壤含水量 Soil moisture content (cm^3/cm^3)	NH_4^+-N (mg/kg)	NO_3^--N (mg/kg)
0—20	2.0	29.8	167.9	32.0	1.58	27.3	0.7	18.4
20—40	0.9	7.7	130.3	30.8	1.56	23.8	0.5	8.2
40—60				31.5	1.58	23.9	0.7	8.0

1.2　试验设计与材料

试验设置 4 个施氮量处理即 N 0(不施肥)、94.5 kg/hm^2(N1)、189 kg/hm^2(N2)和 270 kg/hm^2(N3)。试验采用随机区组设计,每处理重复 3 次,试验小区面积 = 50 m^2(5 m × 10 m)。滴灌系统采用滴灌线,滴头间距 30 cm,每行小麦布设 1 条毛管。每个小区配备一个压差式施肥罐和一个水表,以保证每个小区单独灌水和施肥的要求,灌溉总压力为 0.3 Mpa,平均滴头流速为 0.15 L/h。根据冬小麦的营养特性,各施肥处理的磷、钾肥用量相同,折纯 P_2O_5和 K_2O 的具体用量分别为 84.7 和 118.3 kg/hm^2。氮、钾肥全部滴施,磷肥 20% 作为底肥一次施入,80% 滴施。其中滴施磷肥成分为磷酸一铵,底肥磷肥成分为过磷酸钙,三个处理滴施氮肥中均有 N 13 kg/hm^2 来自磷酸一铵,其余来自于尿素。每次滴灌时按比例随水施肥,具体施肥比例为分蘖期 15%,拔节期 20%,孕穗期 25%,扬花期 25%,灌浆期 15%。试验区根据冬小麦需水规律采用测墒补灌法进行滴灌,以田间持水量的 75% 和 100% 为灌水下限和上限,试验区地处半干旱区,土壤湿度相对干旱区较高,每个主要生育期实际灌水一次,灌水的同时随水施肥一次,具体的灌溉施肥时间和灌溉施肥量见表 2。供试小麦品种为鲁原 502,供试滴灌肥料为水溶性复合肥(新疆自治区农科院研制),肥料成分为尿素、$NH_4H_2PO_4$ 和 KCl。

表 2　试验区灌溉施肥管理

Table 2　Irrigation and fertilizer management of experimental plots

生育期 Growth stages	灌溉施肥日期 Fertigation date (y/m/d)	灌溉量 Irrigation amount (mm)	施氮量 Fertilizer N amount (kg/hm^2)			
			N0	N1	N2	N3
播种 Sowing	2012/10/6	0	0	0.0	0.0	0.0
分蘖期 Tillering	2012/11/7	0	0	14.2	28.4	40.5
拔节期 Jointing	2013/4/6	50	0	18.9	37.8	54.0
孕穗期 Booting	2013/5/1	36	0	23.6	47.3	67.5
扬花期 Flowering	2013/5/16	24	0	23.6	47.3	67.5
灌浆期 Filling	2013/5/30	20	0	14.2	28.4	40.5
合计 Total		130	0	94.5	189	270

1.3 取样与分析

1.3.1 土样取样与测定 根据滴灌后农田土壤不完全湿润,水分在滴头周围形成近似截顶椭球体分布区的特性,在拔节期、抽穗期和扬花期三次灌溉施肥24 h后在各小区内分别用土钻采取U、E和D三点的土壤样品。U点位于滴头正下方,E点和D点分别位于滴头周围湿润土体中离作物较远一侧边界内侧和外测5 cm范围内。根据滴灌量的不同,单个滴头周围的湿润土体水平半径为15—20 cm,具体见图1。取样层次为0—20、20—40、40—60、60—80和80—100 cm,每个取样点、每个层次取1个土样。

另外,分别于冬小麦播前和收获后,在0—20、20—40、40—60、60—80和80—100 cm的5个层次上用土钻取样,为了保证所取样品能够代表田间无机氮平均水平,每小区取两个样点,取样点分别在畦上两株冬小麦之间和滴头下方位置,然后将取自同一土层的土样于田间混合均匀。

每次所取土样置于预先装有冰块的保温箱中,带回实验室后,立即过2 mm筛,称取鲜土24.00±0.005 g,装入500 mL白色振荡瓶中,加入100 mL 1 mol/L的KCl溶液浸提,振荡1 h,将滤液于-18℃冰柜中保存,测定前解冻,利用连续流动分析仪(Auto analyzer 3)测定NO_3^--N和NH_4^+-N浓度。

1.3.2 植株取样与测定 冬小麦收获期根、茎、叶和籽粒四部分分别取样,烘干粉碎,并混合均匀,过0.5 mm筛,阴凉干燥处密封保存。植株样经H_2SO_4-H_2O_2消煮后,用凯氏法测定全氮含量。

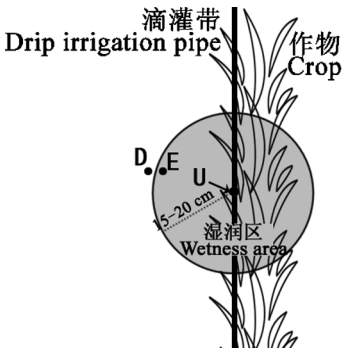

图1 取样点示意图

Fig. 1 Sample location schematic

1.3.3 计算公式及方法

氮表观矿化(kg/hm^2) = 不施氮区作物吸氮量 + 收获后土壤N_{min} - 播前土壤N_{min};

氮表观损失(kg/hm^2) = 播前氮N_{min} + 施氮量 + 表观矿化量 - 施氮区作物吸氮量 - 收获后N_{min}

氮表观损失率(%) = 氮表观损失量/施氮量 × 100;

NO_3^--N累积量(kg/hm^2) = 土层厚度(cm) × 土壤容重(g/cm^3) × NO_3^--N浓度(mg/kg)/10(其中,20—40 cm土层按1.56 g/cm^{3}计算,其他各土层按1.58 g/cm^{3}计算);

氮素吸收利用率(%) = (施氮区作物吸氮量 - 不施氮区作物吸氮量)/施氮量 × 100;

氮素农学利用率(kg/kg) = (施氮区产量 - 不施氮区产量)/施氮量;

氮素生理利用率(kg/kg) = (施氮区产量 - 不施氮区产量)/(施氮区作物吸氮量 - 不施氮区作物吸氮量);

籽粒氮素吸收利用率(%) = (施氮区籽粒部分吸氮量 - 不施氮区籽粒部分吸氮量)/施氮量 × 100。

数据均采用SPSS19.0和Excel2007软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤NO_3^--N水平分布特征

分析土壤NO_3^--N含量的在滴头周围水平分布规律(图2)发现,三次灌溉施肥24 h后,N0处理没有施入氮肥,仅灌溉水中带入少量氮,E点和U点NO_3^--N含量仅略高于D点,N1和N2处理E点的土壤NO_3^--N含量高于U点,具有NO_3^--N在湿润土体边缘聚集的特征,在差异最明显的0—20 cm土层内,N1处理E点含量比U点高26.83%。N3处理则是U点土壤NO_3^--N含量高于E点,没有出现NO_3^--N在湿润土体边缘聚集的现象。表现出随施氮量的增加,滴灌施肥后NO_3^--N在湿润土体边缘聚集的现象越不明显的特征,N2处理U点和E点的NO_3^--N含量差异最小,湿润土体内土壤养分均匀度最高。同期的土壤含水量分析结果为该试验设置的滴灌量下,每次滴灌施肥后水分在土壤中向下运移深度为80 cm以上[15],因此本文未考虑滴灌施肥后尿素淋洗对结果的影响。

2.2 土壤剖面NO_3^--N累积特征

冬小麦收获后,总体来说,0—100 cm土壤剖面NO_3^--N累积量随施氮量的增加而逐渐增加,且施氮量超过N 189 kg/hm^{2}后,土壤剖面硝态氮累积量的增加幅度加大(图2),不施氮处理收获期0—100 cm

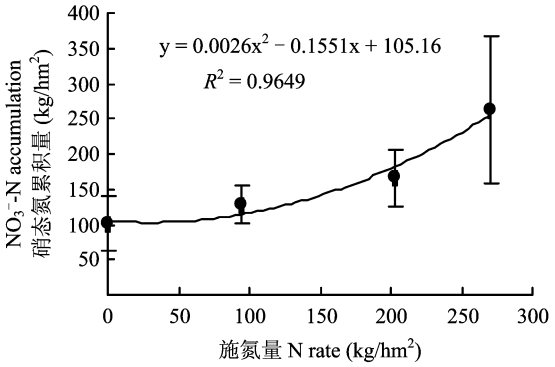

图 2　施氮量与 0—100 cm 土层 NO_3^--N 累积量的关系

Fig. 2　The relation of N fertilization rates and NO_3^--N accumulation in 0–100 cm soil depths

土壤剖面 NO_3^--N 累积量最低，N1、N2 和 N3 处理 0—100 cm 土壤剖面 NO_3^--N 累积量比不施氮处理分别增加了 26.97、65.19 和 162.21 kg/hm^2。

从不同部位不同深度土壤 NO_3^--N 含量分析（图 3），各处理中滴灌施肥 24 h 后，NO_3^--N 在土壤中垂直分布规律基本一致，NO_3^--N 随水运移深度主要在 60 cm 以上。各施 N 处理中随土层的增加 E 点和 U 点的硝态氮含量增加量逐渐减少，0—40 cm 土层的 NO_3^--N 增加量显著高于其他层次，其中 0—20 cm 最高，N1、N2、N3 处理三次滴灌施肥后 E 点和 U 点 0—20 cm 土层的平均 NO_3^--N 含量减去 D 点 NO_3^--N 含量占 0—100 cm 总增加量的比例分别是 75%、83% 和 94%，滴灌施肥后垂直方向上硝态氮没有在湿润体边缘聚集。进而如图 4 所示，冬小麦收获后 0—40 cm 土层 NO_3^--N 累积量占 0—100 cm 土层总量的比例最大，N0、N1、N2 和 N3 处理 0—40 cm 土层所占比例分别为 66%、72%、72% 和 71%。0—20 cm、20—40 cm 以及 40—60 cm 土层内土壤剖面 NO_3^--N 累积量均呈现出施氮量越高 NO_3^--N 累积量越高的趋势。0—20 cm 土层不同施氮处理间土壤 NO_3^--N 累积量在 $P<0.05$ 水平下存在显著差异；20—40 cm 和 40—60 cm 土层中，在 $P<0.05$ 水平下，分别是 N1 和 N2 处理间、N0 和 N1 处理间未达到显著性差异水平，其他处理间差异显著。60—80 cm 和 80—100 cm 土层各处理土壤剖面 NO_3^--N 累积量均较低，在 $P<0.05$ 水平下不存在显著差异。说明施氮量主要影响了 0—60 cm 土层的 NO_3^--N 累积量，对 60—100 cm 土层的影响不大。

2.3　土壤－小麦体系中氮素平衡

每次滴灌施肥后氮素在土壤中的运移分布特征和均匀程度将影响土壤－小麦体系的氮素平衡和氮素利用效率。在氮平衡计算中，考虑到小麦根系有效利用土壤氮的范围，将土壤无机氮所在层次定为 0—100 cm 深度。从表 3 看出，土壤氮素矿化量加上起始无机氮的数量，土壤自身供氮量为 237.8 kg/hm^2，总输入量随氮肥施用量的增加而增加。

施氮量较少时，作物吸氮量随着施氮量的增加而增加，但是当施氮量增加到 N3 水平后，作物吸氮量不但没有增加，反而略有下降。冬小麦收获后 N_{min} 残留随施氮量的增加而增加，当施氮量为 270 kg/hm^2 时，残留量高达 262.2 kg/hm^2，这部分氮素如不能被后茬作物有效吸收，将淋洗出 100 cm 土体或通过反硝化途径损失，造成水体或大气污染。

总体来说，滴灌施肥措施下各处理的表观损失量均较低，介于 0～43.4 kg/hm^2 之间，与施氮量呈正相关关系（$R^2=0.926$），N1、N2 和 N3 的表观损失率分别为 20%、17% 和 16%。

2.4　冬小麦氮素利用率

如表 4 所示，随着施氮量的增加冬小麦籽粒产量呈现先增加后降低的趋势，施氮处理的籽粒产量显著高于不施氮处理，施氮量为 189 kg/hm^2 时籽粒产量最高。综合氮肥吸收利用率、生理利用率、农学利用率和籽粒氮肥吸收利用率，最优的为 N2 处理。

3　讨论

对特定的土壤而言，影响滴灌施肥后氮素空间分布的主要因素是滴头流量、灌水量、肥液浓度和肥料种类等[7-8]。李久生等[5-7]利用 NH_4NO_3 肥料溶液在室内用 15°扇柱体土箱模拟研究滴肥液浓度对砂壤土氮素运移分布规律的影响后认为，肥液浓度是影响 NO_3^--N 分布的主要因子，无论在径向还是垂直方向，NO_3^--N 在距滴头 17.5 cm 范围内呈均匀分布，其浓度随肥液浓度的增加而增加，在湿润边界上 NO_3^--N 产生累积，比滴头周围高出 50% 以上，但是肥液浓度增加湿润峰附近的 NO_3^--N 浓度无明显增加。杨梦娇等[9]通过在大田内按照不同施肥量模拟滴灌施肥发现，径向方向 0—30 cm NO_3^--N 平均含量逐渐减小，在湿润峰处未发现 NO_3^--N 累积现象。Haynes[8]在果园用不同类型肥料进行滴灌施肥对比试验，结果表明施入硫酸铵后矿质氮主要集中在滴头下方的 0—10 cm 土层内，横向运移量很小，施入尿素和硝酸盐后由于它在土壤中具有很好的流动性，矿质氮主要在滴头下方向下运移，横向运移至

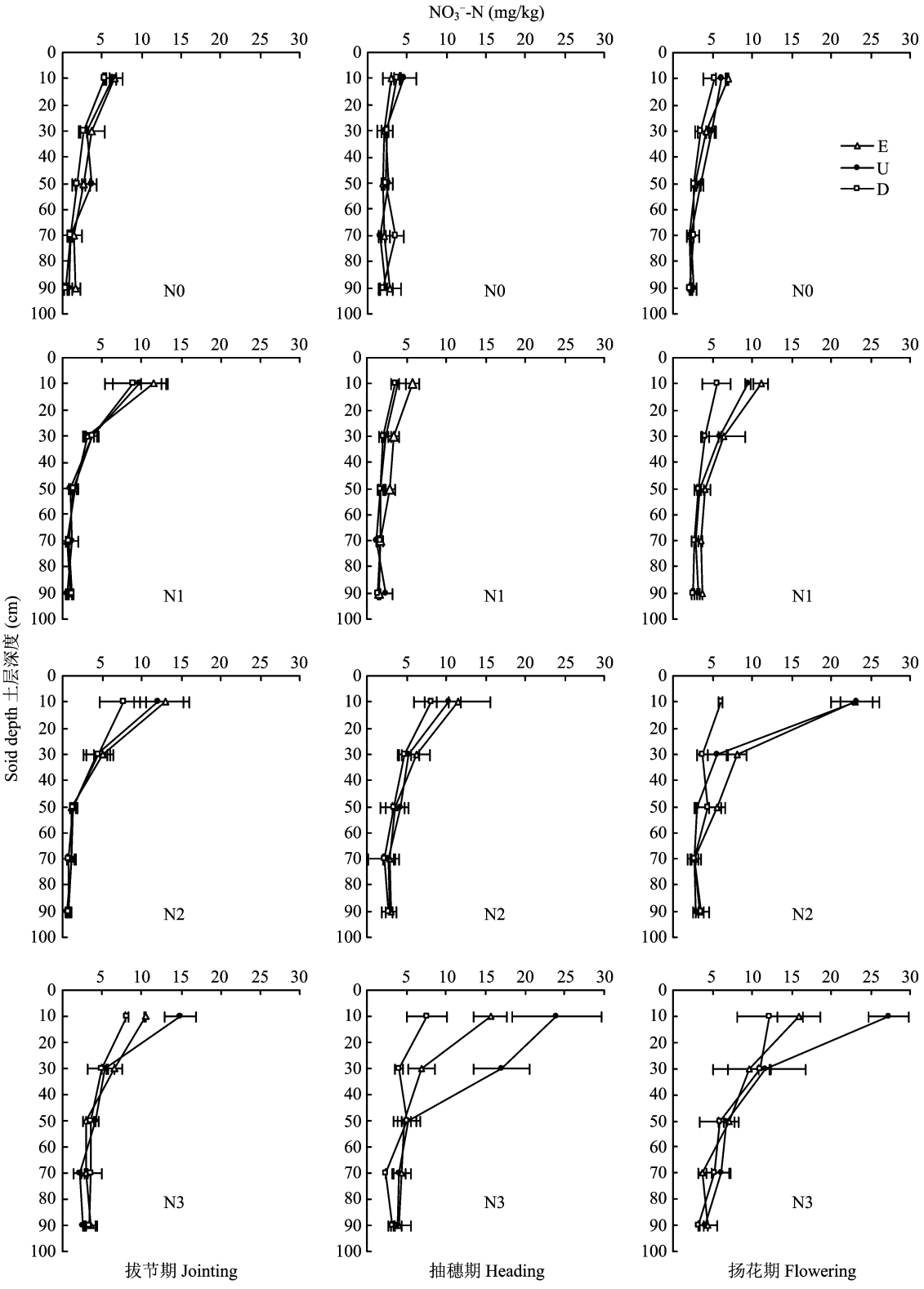

图 3 滴灌施肥 24 h 后不同位置不同层次土壤 NO_3^--N 变化

Fig. 3 Variation of soil NO_3^--N content in different depth 24 h after drip irrigation

[注(Note): U—滴头下方 Under emitter; E—滴头周围湿润土体的边缘 The edge of wet zone around emitter; D—滴头周围形成的湿润土体边缘以外的干燥区 Dry zone near the wet zone around emitter. 图中误差线为三个空间重复的标准误差 The vertical bars indicate standard errors of three replicates.]

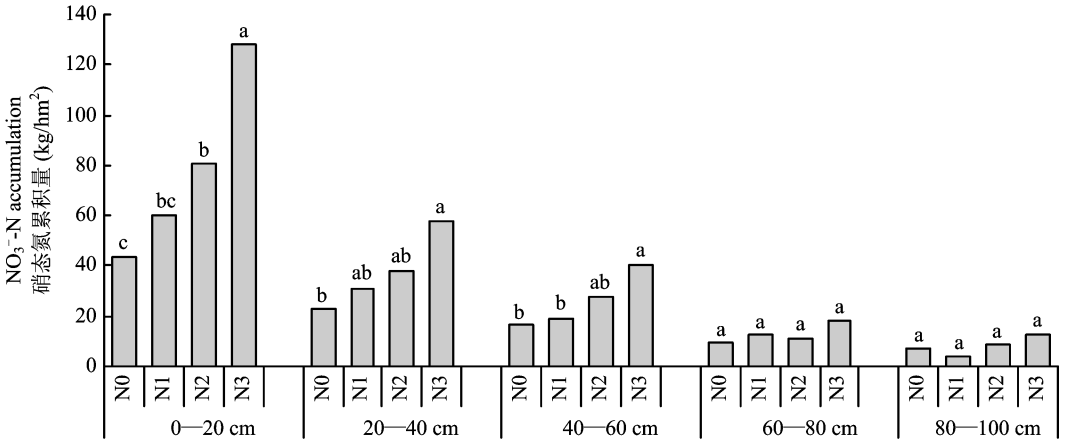

图 4　冬小麦收获后不同施氮水平下不同土层 NO_3^--N 累积量

Fig. 4　NO_3^--N accumulation after winter wheat harvest in different soil depths under different nitrogen fertilizer application rates

[注(Note): 柱上不同小写字母表示同一深度下不同施氮量处理差异显著性($P<0.05$)
Different letters above the bars of different soil depth groups mean significant among different N application rates at the $P<0.05$ level.]

表 3　冬小麦全生育期的 0—100 cm 氮素平衡(kg/hm²)

Table 3　Nitrogen balance across the whole growing season in 0–100 cm soil layers

项目 Item	N0	N1	N2	N3
氮输入 Nitrogen input				
施氮量 Nitrogen rate	0	94.5	189	270
播前 N_{min} N_{min} before sowing	174.6	174.6	174.6	174.6
矿化 Net mineralization	63.2	63.2	63.2	63.2
总投入 Total input	237.8	332.3	426.8	507.8
氮输出 Nitrogen output				
作物携出 Crop uptake	137.3 c	185.7 b	228.6 a	201.7 ab
残留 N_{min} Residual N_{min}	100.8 c	127.9 bc	166.2 b	262.7 a
表观损失 Apparent losses	0	19.1	32.5	43.4

注(Note): 同一行数值后的不同小写字母分别表示处理间差异显著($P<0.05$) Values followed by different small letters within each row are significant among different treatments at $P<0.05$.

表 4　施氮量对冬小麦籽粒产量及氮素利用率的影响

Table 4　Effects of nitrogen supply levels on grain yield and nitrogen use efficiencies of winter wheat

处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield (kg/hm²)	作物吸氮量 Crop N uptake (kg/hm²)	氮素吸收利用率 NRE (%)	氮素生理利用率 NPE (kg/kg)	氮素农学利用率 NAE (kg/kg)	籽粒氮素吸收利用率 GNRE (%)
N0	3936.9 b	137.3 c				
N1	4022.2 b	185.7 b	51.2 a	1.8 c	0.9 b	50.5 a
N2	6384.9 a	228.6 a	48.3 a	26.8 a	13.0 a	41.8 a
N3	4947.6 b	201.7 ab	23.8 b	15.7 b	3.7 b	18.5 b

注(Note): NRE—Nitrogen recovery efficiency; NPE—Nitrogen physiological efficiency; NAE—Nitrogen agronomic efficiency; GNRE—Grain nitrogen recovery efficiency 同列数值后的不同小写字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著 Values followed by different small letters within each column are significant among different treatments at $P<0.05$ level.

距离滴头半径 15 cm 的湿润边界上,但是三种肥料灌溉后滴头下方的矿质氮含量均比湿润体边缘更高。本试验的结果表明,滴灌施肥后,垂直方向上三个处理硝态氮均在土体表面累积,而径向方向上随施氮量的增加,土壤 NO_3^--N 从在湿润土体边缘聚集逐渐变化为在滴头下方聚集,参考上述研究成果,主要原因应该是大田试验中肥液的初始浓度远远高于实验室配置的肥液浓度,而肥液浓度越高,NO_3^--N 在湿润边界聚集的比例越低,因此高肥液浓度也可能是 NO_3^--N 没有在湿润土体边缘聚集的原因之一。本试验中 N2 处理试验结果是滴灌后径向方向上滴头下方和湿润土体边缘的 NO_3^--N 含量没有显著性差异,均匀性最好,说明在滴灌施肥中合理的施肥量有利于提高滴灌后土壤养分的均匀性,促进作物对肥料的吸收。

在滴灌施肥措施下(氮肥种类为尿素),施氮量与土壤 NO_3^--N 残留量成正比,作物收获期 NO_3^--N 含量为表层土(0—20 cm)最高,且在 0—100 cm 剖面呈现降低的趋势,0—40 cm 土层与 0—100 cm 土层的相对 NO_3^--N 累积量为 50% 左右[16-17]。本试验结果与上述研究结果基本一致,N1、N2 和 N3 处理 0—100 cm 土壤剖面 NO_3^--N 累积量比不施氮处理分别增加了 27.0、65.2 和 162.2 kg/hm^2,与施氮量呈正比,0—40 cm 土层 NO_3^--N 累积量比例最大,占 0—100 cm 土层的比例平均为 71%,0—40 cm 土层的比例高于上述研究成果,这应该与本试验中尿素与铵态氮肥混合有关,铵态氮肥更多的被吸附在土壤表层,而后被硝化为 NO_3^--N。

许多研究表明,当施氮量超出一定范围时,不利于后期植株氮素吸收,将不能促进作物对氮素的吸收,甚至降低作物吸氮量和产量[18-20]。本研究中,施氮量从 0 增加到 189 kg/hm^2,冬小麦吸氮量和籽粒产量逐渐增加,当施氮量高于 189 kg/hm^2 后,吸氮量和籽粒产量均有所下降。而 0—100 cm 土层 NO_3^--N 残留量、表观损失量随施氮量的增加持续增高,呈显著正相关关系(R^2 = 0.890,R^2 = 0.926)。连续种植作物的情况下,当季施氮量过高会造成对当季作物收获后土壤 NO_3^--N 累积量高,随着作物种植,表层累积的 NO_3^--N 有向下淋失的趋势[21],本试验中 N3 处理 0—100 cm NO_3^--N 累积量高达 262.70 kg/hm^2,在夏玉米季 7、8 月份雨季来临时存在很大的 N 素淋失风险。因此在滴灌施肥条件下,合理地降低施氮量是减少 NO_3^--N 残留,进而减少农业面源污染的直接和有效途径。

从试验区氮素平衡的结果可以看出,各滴灌施氮量处理的表观损失均较低,表观损失率介于 16%～20% 之间,远低于巨晓棠等[22]在北京冬小麦大田试验得出的表观损失率为 45%～56% 的试验结果,主要原因应该是本试验滴灌量条件下,各处理养分主要分布在 0—60 cm 范围内,减少了氮素的淋溶,从而减少了氮素表观损失率。

综上所述,滴灌施肥措施下,设置合理的灌溉量可调节滴灌施肥后硝态氮主要向下运移至作物根区范围内,且集中在作物根系最密集的 0—40 cm 范围内,肥液浓度对硝态氮运移深度影响不大。滴施入适宜量氮肥有利于提高滴头下方湿润体内径向方向上硝态氮分布的均匀度,从而促进作物对氮素的吸收。N2(189 kg/hm^2)处理滴灌施肥后土壤养分径向方向分布均匀,获得了最高的籽粒产量和氮肥利用效率,基本实现播前和收获后根区土壤 NO_3^--N 累积量平衡,减少了 NO_3^--N 向下淋失的风险,该试验区冬小麦最佳滴灌施氮模式。

参考文献:

[1] Papadopoulos I. Nitrogen fertigation of greenhouse-grown cucumber[J]. Plant and Soil, 1986, 93(1): 87-93.

[2] Burt C, O'Connor K, Ruehr T. Fertigation[M]. San Luis Obispo: California Polytechnic State University irrigation training and research center, 1995.

[3] Haynes R J. Principles of fertilizer use for trickle irrigated crops [J]. Fertilizer Research, 1985, 6(3): 235-255.

[4] 农业部办公厅. 水肥一体化技术指导意见[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/zwllm/zwdt/201303/t20130304_3236967.htm, 2013.
General Office of the Ministry of Agriculture. Fertigation technical guidance [EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/zwllm/zwdt/201303/t20130304_3236967.htm,2013.

[5] Li J S, Zhang J J, Rao M J. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source[J]. Agricultural Water Management, 2004, 67: 89-104.

[6] 李久生, 张建君, 任理. 滴灌点源施肥灌溉对土壤氮素分布影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(5): 61-66.
Li J S, Zhang J J, Ren L. Nitrogen distributions in soil under fertigation from a point source[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(5): 61-66.

[7] 李久生, 张建君, 薛克宗. 滴灌施肥灌溉原理与应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2003.
Li J S, Zhang J J, Xue K Z. Principles and applications of fertigation through drip irrigation systems[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2003.

[8] Haynes R J. Movement and transformations of fertigated nitrogen

below trickle emitters and their effects on pH in the wetted soil volume[J]. Fertilizer Research, 1990, 23: 105-112.

[9] 杨梦娇, 吕新, 侯振安, 等. 滴灌施肥条件下不同土层 NO_3^--N 的分布规律[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(5): 875-881.
Yang M J, Lü X, Hou Z A. Distribution of nitrate nitrogen in different soil layers under drip fertigation [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2013, 50(5): 875-881.

[10] Hanson B, Simunek J, Hopmans J. Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86: 102-113.

[11] 习金根, 周建斌, 赵满兴, 等. 滴灌施肥条件下不同种类氮肥在土壤中迁移转化特性的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004,10(4): 337-342.
Xi J G, Zhou J B, Zhao M X *et al*. Leaching and transforming characteristics of different nitrogen fertilizers added by fertigation [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(4): 337-342.

[12] Hajrasuliha S, Rolston D E, Louie D T. Fate of ^{15}N fertilizer applied to trickle-irrigated grapevines[J]. American Journal of Enology and Viticulture, 1998, 49: 191-198.

[13] Rajput T B S, Patel N. Water and nitrate movement in drip-irrigated onion under fertigation and irrigation treatments[J]. Agricultural Water Management, 2006, 79(3): 293-311.

[14] 陈健, 宋春梅, 刘云慧. 黄淮海平原旱田氮素损失特征及其环境影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2006,14(2): 99-102.
Chen J, Song C M, Liu Y H. Characteristics of N loss and its environmental effects in the dryland of Huang-Huai-Hai plain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(2): 99-102.

[15] 陈静, 王迎春, 李虎, 等. 滴灌施肥对免耕冬小麦水分利用及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(10): 1966-1975.
Chen J, Wang Y C, Li H *et. al*. Effects of drip fertigation with no-tillage on water use efficiency and yield of winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(10): 1966-1975.

[16] 井涛, 樊明寿, 周登博, 等. 滴灌施氮对高垄覆膜马铃薯产量、氮素吸收及土壤 NO_3^--N 累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 654-661.
Jing T, Fan M S, Zhou D B *et al*.. Effects of nitrogen fertilization on potato tuber yield, N uptake and soil NO_3^--N accumulation under plastic mulching with drip irrigation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(3): 654-661.

[17] 姜慧敏, 张建峰, 杨俊诚, 等. 施氮模式对番茄氮素吸收利用及土壤 NO_3^--N 累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2623-2630.
Jiang H M, Zhang J F, Yang J C *et al*. Effects of models of n application on greenhouse tomato n uptake, utilization and soil NO_3^--N accumulation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2623-2630.

[18] 赵俊晔, 于振文, 李延奇, 等. 施氮量对土壤无机氮分布和微生物量氮含量及小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006,12(4): 466-472.
Zhao J Y, Yu Z W, Li Y Q *et al*. Effects of nitrogen application rate on soil inorganic nitrogen distribution, microbial biomass nitrogen content and yield of wheat [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006,12(4): 466-472.

[19] 韩燕来, 葛东杰, 汪强, 等. 施氮量对豫北潮土区不同肥力麦田氮肥去向及小麦产量的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 141-154.
Han Y L, Ge D J, Wang Q *et al*. Effect of N fertilizer rate on fate of labeled nitrogen and winter wheat yield on different soil fertility fields in chao soil area in North Henan[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(5): 141-154.

[20] 林琪, 侯立白, 韩伟. 不同肥力土壤下施氮量对小麦子粒产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 561-567.
Lin Q, Hou L B, Han W. Effects of nitrogen rates on grain yield and quality of wheat in different soil fertility[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(6): 561-567.

[21] 张学军, 赵营, 陈晓群, 等. 滴灌施肥中施氮量对两年蔬菜产量、氮素平衡及土壤 NO_3^--N 累积的影响[J]. 中国农业科学, 2007,40(11): 2535-2545.
Zhang X J, Zhao Y, Chen X Q *et al*. Effects of application of nitrogen on vegetable yield, nitrogen balance and soil nitrogen accumulation under two years' drip fertigation [J]. Scientia Agricultural Sinica, 2007, 40(11): 2535-2545.

[22] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1361-1368.
Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Study on Effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Scientia Agricultural Sinica, 2002, 35(11): 1361-1368.