

基于¹⁵N 同位素示踪盐渍化农田向日葵氮素利用规律

乔 天, 刘 霞, 杨 威, 高宏远

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为探明盐渍化农田不同施氮水平下向日葵氮素吸收利用规律, 采用¹⁵N 同位素示踪技术进行田间微区试验, 以不施氮处理(N0)为对照, 设计 3 种施氮水平(N1=150 kg/hm²、N2=225 kg/hm²、N3=300 kg/hm²), 于向日葵成熟期测定植株和 0—100 cm 土层土壤¹⁵N 同位素丰度及总氮含量, 研究各处理肥料氮素的去向及其利用机制。结果表明: 向日葵氮素吸收量随施氮量的增加而增加, 成熟期作物氮素吸收量在 N2 水平较不施氮显著增加 38.7%; 土壤氮和肥料氮对作物当季氮素吸收的贡献比例为 84.9%和 15.1%。N2 水平下, 肥料氮的贡献比例较 N1 增加 35.7%, 土壤氮的贡献比例较 N1 降低 4.3%。肥料氮残留量随土层深度增加而减少, 土壤中 47.4%的残留肥料氮主要集中在 0—20 cm 土层。不同施氮水平下肥料氮去向均表现为氮肥损失率>氮肥残留率>氮肥利用率, N2 施氮水平下氮肥利用率较 N1、N3 显著提高 22.7%和 14.6%, 土壤残留率较 N1、N3 减少 8.5%和 8.6%。综合考虑向日葵氮素吸收利用及土壤中氮素残留情况, 225 kg/hm²施氮量下氮肥利用率为 27.4%, 氮肥残留率为 32.3%, 氮肥损失率为 40.3%, 是中度盐渍化农田较适宜的施氮量。

关键词: 盐渍化农田; ¹⁵N 示踪技术; 氮肥利用率; 氮肥残留率; 氮肥损失率

中图分类号: S145.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0344-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.042

Nitrogen Utilization Pattern of Sunflower in Saline Farmland Based on ¹⁵N Isotope Tracer

QIAO Tian, LIU Xia, YANG Wei, GAO Hongyuan

(College of Water Conservation and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018)

Abstract: To investigate the nitrogen absorption and utilization patterns of sunflower under different levels of nitrogen application in saline farmland, a field micro-area experiment was conducted using ¹⁵N isotope tracing technique, and three levels of nitrogen application (N1=150 kg/hm², N2=225 kg/hm², N3=300 kg/hm²) were designed with no nitrogen application treatment (N0) as the control. The ¹⁵N isotope abundance and total nitrogen (TN) content of sunflower and 0—100 cm soil layer were measured at maturity of sunflower to study the fate and utilization mechanism of fertilizer nitrogen in each treatment. The results showed that the nitrogen absorption of sunflower increased with the increasing of nitrogen application, and the nitrogen uptake of the sunflower at maturity increased significantly by 38.7% at the N2 level compared with no nitrogen application. The contribution of soil N and fertilizer N to the nitrogen uptake of the sunflower in the current season was 84.9% and 15.1%, respectively. At the N2 level, the contribution ratio of fertilizer N increased by 35.7% compared with N1, and the contribution ratio of soil N decreased by 4.3% compared with N1. The residual fertilizer N decreased with the increasing of soil depth, and 47.4% of residual fertilizer N in the soil mainly concentrated in the 0—20 cm soil layer. At different N application levels, the fate of fertilizer N showed loss rate > residual rate > utilization rate, and under the nitrogen application level of N2, N utilization rate significantly increased by 22.7% and 14.6% compared with N1 and N3, respectively, and the soil residual rate reduced by 8.5% and 8.6% compared with N1 and N3, respectively. Considering the nitrogen uptake and utilization of sunflower and the nitrogen residue in soil, under 225 kg/hm² of nitrogen applica-

收稿日期: 2022-01-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(51869019)

第一作者: 乔天(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从盐碱地水盐氮素迁移规律研究。E-mail: 2252817318@qq.com

通信作者: 刘霞(1971—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业水土环境及水文水资源研究。E-mail: liukasumi@126.com

tion, the nitrogen utilization rate was 27.4%, the nitrogen residue rate was 32.3% and the nitrogen loss rate was 40.3%, which was a more suitable nitrogen application rate for moderately salinized farmland.

Keywords: salinized farmland; ¹⁵N tracer technology; nitrogen fertilizer utilization rate; nitrogen fertilizer residual rate; nitrogen fertilizer loss rate

河套灌区作为我国向日葵的主产区,其土壤盐渍化问题严重,盐碱地占总耕地面积的 45%左右^[1]。较高的盐分使土壤中养分难以被直接利用,并导致作物吸氮能力减弱^[2]。氮肥对向日葵生长产生的肥效最为明显^[3],它能够缓解盐分对作物生长带来的不利影响,补充土壤对作物养分供给上的亏缺^[4]。然而氮素的有效性在不同水平盐分土壤中存在差异,当盐分水平较低时,增施氮肥可明显促进作物生长;盐分含量较高时,盲目增施氮肥会导致浪费,增加了氮素的潜在淋洗损失,可能造成地下水污染,加重土壤发生次生盐渍化风降并降低了氮肥利用率^[5];其次,作物种类、土壤性质、施肥量及方法也是影响氮肥利用效率的因素^[6]。对于向日葵作物,其施氮量存在一定范围,超出合理施氮量氮肥利用率则会受到抑制^[7]。故针对灌区中度盐渍化农田合理施用氮肥展开研究具有实际意义。

氮素是植物生长发育的必须营养元素之一,是叶绿素和多种有机物的成分,可以促进发育,为作物的高产增收奠定基础,因而氮肥施用是当前生产条件下保障河套灌区向日葵高产的重要措施^[8]。前人^[9-11]研究大多集中于施氮对向日葵水分利用特点、冠层生长与辐射利用规律、产量与品质等方面,而针对不同施氮水平下农田中氮肥施用后迁移转化途径及作物吸收可利用氮素来源比例的研究相对较少。同位素示踪技术不仅能区分作物吸收的土壤氮与肥料氮,真实地反映作物对当季甚至上季氮肥的吸收利用状况,明确氮素来源,还可计算肥料氮在土壤中的残留与分布状况^[12]。目前多数研究^[13]主要采用差值法计算作物氮肥利用率,通过土壤中硝态氮含量来评价作物收获后的氮素残留状况^[14],鲜有研究利用氮同位素示踪技术研究盐渍化农田向日葵收获后土壤中肥料氮利用与残留问题。

本研究针对河套灌区中度盐渍化农田,采用¹⁵N 同位素示踪技术,以向日葵为试材,系统分析土壤—向日葵作物体系中肥料氮素的归趋问题,探究不同施氮水平对向日葵不同来源氮素吸收、土壤中肥料氮残留和氮素去向的影响,以期为该地区农田推荐适宜的施氮量提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2020 年 6—9 月在河套灌区中部五原县

联星村(107°35′70″E,40°46′30″N)进行,该地区属于典型的温带大陆性季风气候。全年日照时间平均 3 230.9 h,年降水量 227.4 mm,月分配极不均,主要集中在夏季 7—9 月,年际变化也较大。年平均蒸发量为 2 039.2 mm,是降水量的 9.0 倍。试验地土壤质地见表 1。土壤盐分含量为 3.3 g/kg,碱化度为 14.6%,有机质含量为 9.3 g/kg,全氮含量为 0.8 g/kg,碱解氮含量为 44.4 mg/kg,速效磷含量为 14.1 mg/kg,速效钾含量为 184.3 mg/kg,属于肥力不足的中度盐碱化土壤。

表 1 试验地土壤粒径及质地

土层 深度/cm	颗粒质量分数/%			土壤 质地
	<0.002 mm	0.02~0.002 mm	2~0.02 mm	
0—20	9.9	39.4	50.7	粉壤土
20—40	5.9	49.7	44.4	粉壤土
40—60	11.9	12.6	75.5	粉砂壤土
60—80	6.5	11.9	81.6	砂壤土
80—100	15.6	18.0	66.4	粉壤土

1.2 试验设计

试验设计 4 个施氮水平,记为 N0、N1、N2、N3,对应大田施氮量(按纯 N 计)分别为 0,150,225,300 kg/hm²。于田间设置¹⁵N 试验微区,每个微区面积为 1.5 m²,将未封底的铁皮从微区四周挖沟嵌套进去,地下部分埋深 100 cm,地上部分 10 cm(避免标记尿素的水平向流失以及污染)。供试向日葵品种为 NWS6901 型食葵,具有耐盐碱、抗病等特点。于 2019 年 6 月 22 日播种,9 月 27 日收获,生育期约为 96 天。参考当地向日葵种植方式,行距 60 cm,株距 50 cm,播种前施入底肥磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O),施用量分别为 108.4,86.8 kg/hm²,施用的¹⁵N 标记尿素丰度为 10.18%(含氮 46.0%),由上海化工研究院生产,作为追肥施用。每个处理设 3 个重复,为避免受到铁皮边界的影响,播种后每个微区定苗 3 株,并于现蕾期在向日葵根区土壤结合头水追施¹⁵N 标记尿素,施肥方式为穴施,灌溉方式采用畦灌,灌水量为 900 m³/hm²。其他管理措施与当地农田相一致。

1.3 测定项目与方法

于向日葵完熟期收取各处理植株,并将其分解为根、营养器官(茎、叶、盘)、籽部分,分装在牛皮纸信封中,测定样品鲜重,将称重后的植株样品置于干燥箱中 105 ℃杀青 30 min,再恒温 80 ℃烘干 8 h 至质量

恒定,称量并测得植株各部分干物质质量,最后将植株各部位均剪取一部分均匀混合,在研钵中粉碎后过 0.5 mm 筛后装入样品袋中备用。

作物收获后对微区内 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 土层钻取土样,采用氯化钾溶液提取一分光光度计法^[15]测定土壤 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 含量。其余土样风干过筛与植物样一起送往内蒙古农业大学草原与资源环境学院,使用德国 Elementar 公司生产的 Isoprime100 稳定同位素质谱仪连接元素分析仪(Vario Isotope Select)测定植物各器官及土壤的全氮含量(TN)和稳定氮同位素值(δ¹⁵N)。

1.4 指标计算

相关指标计算公式^[16]为:

$$Ndff = \frac{a - c}{b - c} \times 100\%$$

式中:Ndff 为植株氮素来源于肥料的比例(%);*a* 为植株样品中的¹⁵N 丰度(%);*b* 为标记肥料中的¹⁵N 丰度(%);*c* 为同位素自然丰度,0.366 3%。

$$Ndfs = \frac{d - c}{b - c} \times 100\%$$

式中:Ndfs 为土壤氮素来自肥料的比例(%);*d* 为土壤样品中的¹⁵N 丰度(%)。

$$N_P = M_P \times TN_P$$

式中:*N_P* 为各器官吸氮量(g/plant);*M_P* 为各器官干物质质量(g);*TN_P* 为各器官全氮含量(g/kg)。

$$N_F = N_P \times Ndff$$

式中:*N_F* 为各器官对肥料氮的吸收量(g/plant)。

$$N_S = N_P - N_F$$

式中:*N_S* 为各器官对土壤氮的吸收量(g/plant)。

$$NDR_F = \frac{N_F}{N_S} \times 100\%$$

式中:NDR_F 为肥料氮贡献率(%)。

$$NDR_S = \frac{N_S}{N_P} \times 100\%$$

式中:NDR_S 为土壤氮贡献率(%)。

$$NR = MS \times TN_S \times Ndfs$$

式中:NR 为土壤中肥料氮残留量(g);MS 为土壤干重(g);TN_S 为土壤全氮量(g/kg)。

$$NUE = \frac{N_F}{TFN} \times 100\%$$

式中:NUE 为氮肥利用率(%);TFN 为氮肥施用总量(g)。

$$NRF = \frac{N_R}{TFN} \times 100\%$$

式中:NRF 为氮肥残留率(%)。

$$NLR = 1 - NUE - NRF$$

式中:NLR 为氮肥损失率(%)。

1.5 数据处理

使用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据处理,采用 SPSS 20.0 软件进行不同处理的单因素方差分析,差异显著性检验用 LSD 法,显著性水平 α=0.05,用 Origin 2019b 软件作图。

2 结果与分析

2.1 向日葵干物质积累量及分配差异

由表 2 可知,向日葵单株干物质质量在 N2 施氮水平下较 N0、N1 显著增加 31.7%,13.9%(*p*<0.05),在 N3 施氮条件下较 N2 高出 1.6%(*p*>0.05)。葵籽干物质质量在 N1、N2、N3 施氮水平下差异达显著水平,较不施氮处理增加 14.4%,22.2%,24.0%。相较于 N0 水平,施氮后的向日葵根系、营养器官干物质也呈现出不同程度的增加,增幅平均为 35.7%,28.6%。随施氮量的增加,根和营养器官生物量分配率逐渐增加,而籽的生物量分配率与之相反,呈现出缓慢降低的趋势,降幅约为 2.4%。从上述结果可以看出,施氮可以显著促进向日葵根系的生长发育,从而有利于吸收更多的氮素并通过营养器官输送到葵籽中,以促进产量的形成,施氮量为 N2 水平时可满足向日葵作物生长需求,对向日葵植株生长的促进作用最为显著。

表 2 向日葵干物质积累及分配差异

处理	干物质质量/(g·plant ⁻¹)				分配率/%		
	根	营养器官	籽	整株	根	营养器官	籽
N0	112.1±5.6c	346.4±13.9c	215.7±10.8b	674.1±23.7c	16.6±0.7c	51.4±2.1a	32.0±1.3a
N1	129.8±6.5c	403.2±16.1b	246.7±12.3b	779.8±19.2b	16.7±1.0b	51.7±3.1a	31.6±1.9a
N2	160.8±9.8a	463.5±18.5a	263.6±10.1a	887.9±18.0a	18.1±0.5a	52.2±2.8a	29.7±0.9a
N3	165.6±8.1a	469.1±18.6a	267.5±11.1a	902.2±20.5a	18.4±0.9a	53.0±2.6a	39.6±1.5a

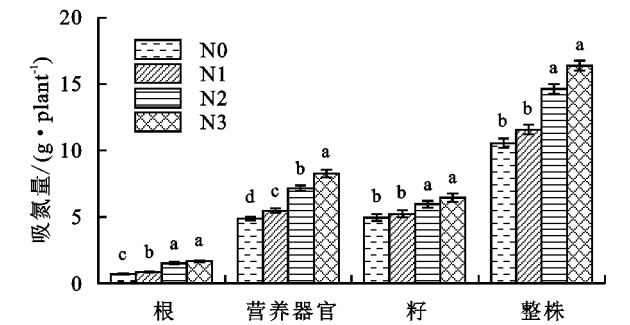
注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字小写字母表示处理间差异显著(*p*<0.05)。下同。

2.2 向日葵吸氮及分配差异

由图 1 可知,N2、N3 施氮水平下向日葵整株吸氮量较 N0 分别显著增加 38.7%,55.4%,较 N1 分别显著增加 26.3%,41.5%,N3 较 N2 增加 12.1%(*p*>0.05)。与

N0 相比,N1、N2、N3 下的根系吸氮量分别增加了 22.5%,112.1%,135.2%;营养器官吸氮量分别增加了 12.3%,46.7%,69.4%;籽粒吸氮量分别增加了 5.4%,20.2%,30.0%。不同施氮水平下向日葵营养器官和籽

粒的氮素分配率未表现出明显差异(表 3),在 N2、N3 2 种施氮水平下,根系的氮素分配率较 N0 显著增加,增加范围为 3.6%~3.8%。说明施氮增加各器官对氮素的吸收量,对根系产生的作用最为显著。



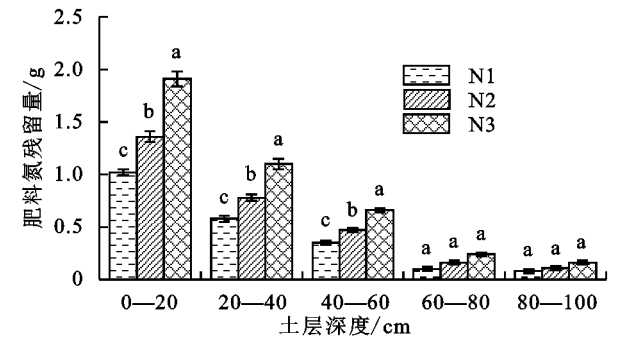
注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同施氮水平下向日葵吸氮量

表 3 不同施氮水平下氮素分配率 单位: %

器官	N0	N1	N2	N3
根	6.7±0.2b	7.5±0.4b	10.3±0.3ab	10.5±0.5a
营养器官	46.3±1.9a	47.3±2.9a	48.9±1.4a	50.5±2.5a
籽	47.0±1.9a	45.2±2.7a	40.7±1.3a	39.4±2.0a

施氮水平由 N1 增至 N3(图 2),向日葵根系对肥料氮和土壤氮的吸收比例分别增加 113.4%,7.9%;营养器官和葵籽对肥料氮的吸收比例分别增加 49.0%,18.0%,对土壤氮的吸收比例降低幅度分别为 1.8%,13.7%。3 种施氮水平下肥料氮及土壤氮对整株向日葵氮素吸收的贡献比例平均分别为 15.1%,84.9%。N2、N3 施氮水平下肥料氮对整株作物的贡献比例较 N1 分别显著增加 35.7%,40.5%,而土壤氮的贡献比例较 N1 分别显著降低 4.3%,5.2%,土壤氮及肥料氮对整株向日葵的贡献比例在 N2、N3 施氮水平下无显著性差异。以上结果表明,增施氮肥可以提高各器官对氮素的吸收,以满足植株生长所需的氮素营养,施氮对根系吸氮的促进作用最为



显著。向日葵当季吸收氮素主要源于土壤氮,增施氮肥至 N2 水平可以促进肥料氮对向日葵氮素吸收的贡献比例,继续增施氮肥促进效果不显著。

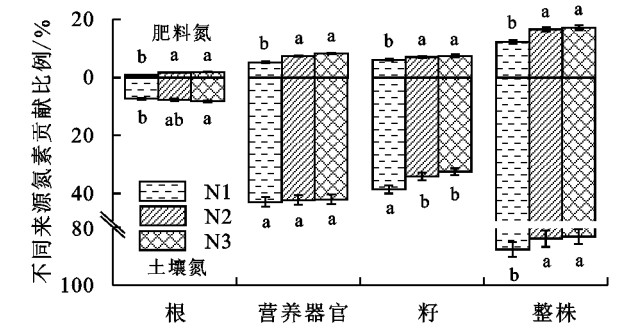
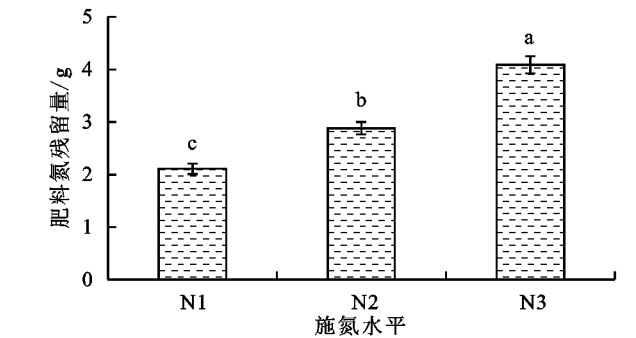


图 2 不同施氮水平下不同来源氮素贡献比例

2.3 土壤中肥料氮残留量

由图 3 可知,向日葵收获后,在 3 种施氮水平下,0—20 cm 土层肥料氮残留所占比例分别为 48.3%,47.2%,46.7%,20—40 cm 土层肥料氮残留所占比例分别为 27.5%,27.1%,26.9%,40—60 cm 土层肥料氮残留所占比例分别为 16.6%,16.3%,16.1%,各土层残留肥料氮所占比例均呈现随施氮量增加而减小趋势,60—100 cm 土层累积残留比例分别为 8.5%,9.3%,10.3%。在土壤垂直剖面上,土壤中肥料氮残留量表现为随土层深度增加而递减趋势,残留肥料氮主要集中在 0—20 cm 土层。0—100 cm 土层肥料氮总残留量在不同施氮水平下呈现出显著差异,总体表现为 N3>N2>N1,N2 施氮水平下肥料氮残留总量较 N1 增加 36.5%,N3 水平下肥料氮残留总量较 N2 增加 42.0%。由图 4 可知,各处理 0—100 cm 土壤 NO₃⁻-N 含量为 6.3~21.6 mg/kg,NH₄⁺-N 含量为 1.0~9.8 mg/kg,相同处理各土层 NH₄⁺-N 含量明显低于 NO₃⁻-N,肥料氮主要是以 NO₃⁻-N 形态残留于土壤中。综上,较高施氮使肥料氮残留增加的同时,也提高了深层土壤中(60—100 cm)肥料氮残留的比例。



体呈现出随施氮水平增加而减小的趋势,其中 N2 施氮水平下土壤氮肥残留率最低,为 32.3%,较 N1、N3 施氮水平分别减少 8.5%,8.6%,存在显著差异。氮肥损失率在各施氮水平间不存在显著性差异,说明氮肥损失所占比例受施氮水平的影响较小。3 种施氮水

平下氮肥利用率、氮肥残留率、氮肥损失率平均分别为 24.6%,33.7%,41.7%,肥料氮素去向规律均表现为氮肥损失率>氮肥残留率>氮肥利用率。说明本试验条件

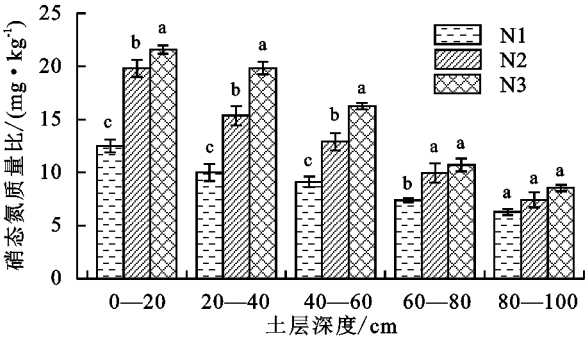


图 4 不同施氮水平下肥料氮残留形态

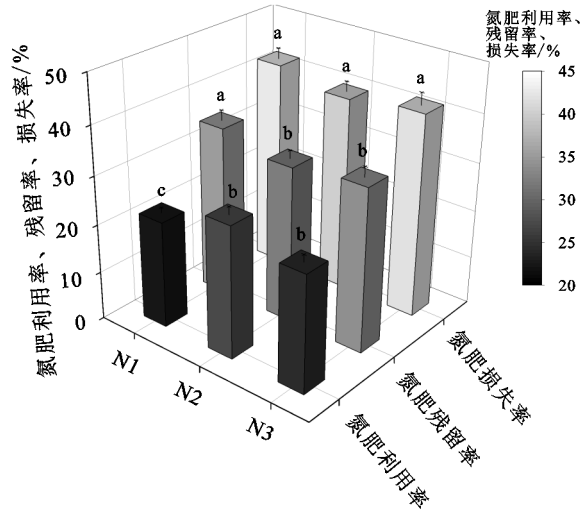


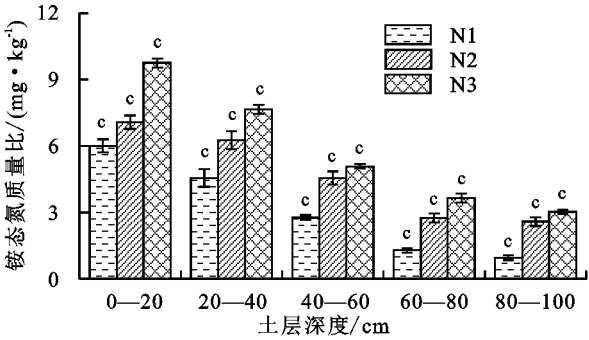
图 5 不同施氮水平下氮肥氮利用率、残留率及损失率

3 讨论

3.1 不同施氮水平对向日葵干物质质量及氮素吸收利用影响

本试验中,施氮水平由 N1 增至 N2 时,向日葵干物质质量和吸氮量的增加比例最大,产生的促进作用最显著,而 N2、N3 种施氮水平之间差异不显著,表明施氮量达一定水平后,继续增施氮肥对向日葵吸收氮素和生长的促进作用并不明显,可能是因为高氮肥供应显著抑制根系固氮的酶活性,并导致植物氮素吸收及生物量不再进一步增加^[17]。前人^[18]针对不同施氮水平及基追施比例下植株吸收氮素来源进行研究,均得出土壤氮素对植株生长发育的贡献率高于肥料氮的结果,本研究也得出相似结论,不同氮素来源对向日葵植株的贡献比例表现为土壤氮>肥料氮,说明施氮水平如何不同,土壤氮都是向日葵氮素养分的主要来源。孙昭安等^[19]在对冬小麦氮素吸收的研究中得出的结论是施氮量与化肥氮对冬小麦氮素吸收的贡献比例呈显著正相关,而与土壤氮贡献比例呈显著负相关。本研究中,肥料氮贡献比例是随施氮量增加呈

不同施氮条件下肥料氮素去向均以损失为主,N2 施氮水平在提高氮肥利用率的同时,相对减少了土壤中氮肥氮的残留。



现递增趋势,土壤氮贡献比例与之相反,也进一步表明,增施氮肥可提高肥料氮在作物中的运输量和分配效率。除向日葵根系外,向日葵营养器官和葵籽对土壤氮的吸收比例随施氮量的增加而增加,可能是因为土壤中氮素可以在植株根系内直接被同化利用的缘故^[20],但是这种作用对向日葵地上部器官产生的效果不明显。

3.2 不同施氮水平下土壤中氮素残留

残留肥料氮在提高土壤肥力方面发挥重要作用,但同时也增加了氮素损失风险^[21]。有研究^[22]表明,土壤氮素的残留可以提高对土壤全氮、矿质态氮含量及土壤氮库的补充,能被后一季作物继续吸收利用^[23]。张怀志等^[23]对比分析得出,微喷灌常规和减施氮肥条件下 0—20 cm 土层肥料氮残留量分别占土壤肥料氮总残留量的 88.9% 和 87.9%,本研究中肥料氮残留主要集中在 0—20 cm 土层,与 Zhong 等^[24]研究结果相类似,但 0—20 cm 土层肥料¹⁵N 仅占总残留量的约 47.4%,与前人^[23-24]研究结果存在较大差异的原因也可能是施氮方式、施氮水平以及作物种类不同引起的。以上结果表明,土壤盐分不影响肥料氮在土壤中残留的主要深度,但使部分残留氮肥向下运移,且随施氮量增加,0—60 cm 土层肥料氮残留所占比例减小,60—100 cm 土层肥料氮残留比例升高,在 8.5%~10.3%,增施氮肥进一步增加残留氮肥在深层土壤中淋洗的风险。一般认为,增加施氮量提高了下层土壤肥料氮的积累量,加大了向根系外淋洗的风险^[25]。

3.3 不同施氮水平下肥料氮素去向

本试验向日葵—土壤系统中,氮肥迁移量总体表现为损失率>残留率>利用率,与戴香良等^[26]研究花生肥料氮素去向为利用率>残留率>损失率的结果有所不同,因为不同作物之间对氮肥吸收利用的能

力存在较大差异,也可能是试验区干旱及盐碱土壤使铵态氮的挥发量大而导致损失率较高,还有待于深入分析干旱盐渍化农田土壤盐分对氮素迁移规律的影响。在最佳经济施氮量下,内蒙古中西部氮肥利用率平均为 34.7%^[11],随施氮量的增加氮肥吸收利用率和损失率也增加,土壤中氮肥残留率减小^[27]。本试验得出的结果与之略有不同,3 种施氮量水平下氮肥利用率分别为 22.3%,27.4%,23.9%,土壤残留率先减小后增加,但总体呈现下降趋势,分别为 35.1%,32.3%,33.8%。一方面是因为氮肥利用率在实际生产中会受到土壤肥力的影响^[28]而导致差异;另一方面,是因为土壤盐分离子会抑制作物对氮素的吸收利用,从而成为氮素循环利用的关键制约因素之一^[3]。随施氮量增加氮肥损失率减少,存在气候因子带来的影响,还可能与高氮投入时通过挥发等途径损失有关^[29],因而后续研究把控不同施氮水平条件下的气体挥发损失的占比大小尤为重要。

4 结 论

(1)不同施氮量条件下向日葵氮素吸收量差异显著。225 kg/hm² 施氮量在满足向日葵作物生长同时,较不施氮处理显著增加了 38.7% 的氮素吸收量,继续增施氮肥对作物吸氮量无明显促进作用。

(2)向日葵吸收的氮素中,84.9% 来源于土壤氮,15.1% 来源于肥料氮,增施氮肥至 225 kg/hm² 时使肥料氮的贡献比例较 150 kg/hm² 水平增加 35.7%,继续施氮促进效果不显著。

(3)1 m 土层中肥料氮总残留量随施氮量增加而增加,约 47.4% 的残留肥料氮分布在 0—20 cm 土层,较高的施氮水平会加大肥料氮在深层(60—100 cm)土壤中残留的风险。

(4)不同施氮水平肥料氮去向总体表现为损失率>残留率>利用率。N₂ 施氮水平下氮肥利用率较 N₃、N₁ 分别显著高出 22.7%,14.6%;氮肥残留率较 N₁、N₃ 分别减少 8.5%,8.6%;氮肥损失率在各施氮水平下无显著差异。

针对中度盐渍化农田,225 kg/hm² 施氮水平下肥料氮利用率为 27.4%,氮肥残留率为 32.3%,肥料损失率为 40.3%。在提高氮肥利用率的同时降低了土壤中氮肥残留率和损失率,可兼顾作物生长及减少环境污染的要求,是较为适宜的施氮量。

参考文献:

[1] 王民哲.内蒙古河套灌区盐碱化耕地改良措施及建议[J].中国水利,2019(15):40-41.

[2] 李红强,姚荣江,杨劲,等.盐渍化对农田氮素转化过程

的影响机制和增效调控途径[J].应用生态学报,2020,31(11):3915-3924.

[3] 韩成,樊秀荣,张红萍,等.临河区食用向日葵养分肥效和最佳施肥量研究[J].安徽农业科学,2018,46(36):134-136,145.

[4] 曾文治,徐驰,黄介生,等.土壤盐分与施氮量交互作用对葵花生长的影响[J].农业工程学报,2014,30(3):86-94.

[5] 霍星,史海滨,田德龙,等.盐分条件下水氮对向日葵影响及其产量模型研究[J].节水灌溉,2012(6):22-26.

[6] 吕小红,付立东,王宇,等.氮肥运筹对滨海稻区钵苗机插水稻产量及氮肥利用率的影响[J].福建农业学报,2018,33(2):125-130.

[7] 郭富强,史海滨,杨树青,等.盐渍化灌区不同水肥条件向日葵氮磷利用率及淋失规律[J].水土保持学报,2012,26(5):39-43.

[8] 王伟妮,高娃,郑硕,等.内蒙古典型生态区不同类型向日葵氮肥响应差异[J].中国土壤与肥料,2020(4):140-149.

[9] 李琦,马韬,曾文治,等.水、盐和施氮量交互作用对向日葵水分利用的影响[J].中国农村水利水电,2016(3):27-30.

[10] 马韬,曾文治,伍靖伟,等.不同施氮量下盐渍农田向日葵冠层生长与辐射利用规律[J].农业机械学报,2020,51(12):292-303.

[11] 国世佳,段玉,张君,等.施氮量对食用向日葵产量及品质的影响[J].中国土壤与肥料,2019(2):126-132.

[12] 王西娜,王朝辉,李华,等.旱地土壤中残留肥料氮的动向及作物有效性[J].土壤学报,2016,53(5):1202-1212.

[13] 郭宇,李仙岳,丁宗江,等.不同施氮方式对向日葵氮肥利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(7):20-27.

[14] 娄帅,杨树青,刘瑞敏,等.内蒙古河套灌区向日葵增产氮磷肥优化配施模式研究[J].灌溉排水学报,2020,39(8):35-43.

[15] 窦旭,史海滨,李瑞平,等.河套灌区控制排水对氮素流失与利用的影响[J].农业机械学报,2021,52(11):315-322,420.

[16] 王士红,聂军军,李秋芝,等.施氮量对土壤—棉花系统中氮素吸收利用和氮素去向的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(4):738-745.

[17] 高丽敏,苏晶,田倩,等.施氮对不同水分条件下紫花苜蓿氮素吸收及根系固氮酶活性的影响[J].草业学报,2020,29(3):130-136.

[18] Quan Z, Li S L, Zhang X, et al. Fertilizer nitrogen use efficiency and fates in maize cropping systems across China: Field ¹⁵N tracer studies [J]. Soil and Tillage Research, 2020, 197(C): 1-9.

[19] 孙昭安,陈清,朱彪,等.化肥氮对冬小麦氮素吸收的贡献和土壤氮库的补偿[J].植物营养与肥料学报,2020,26(3):413-430.

[20] 陈雅君,闫庆伟,张璐,等.氮素与植物生长相关研究进展[J].东北农业大学学报,2013,44(4):144-148.

[21] 夏梦洁.黄土高原旱地残留肥料氮及夏季休闲期间的去向[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.

[22] 陆晓松,于东升,徐志超,等.土壤肥力质量与施氮量对小麦氮肥利用效率的综合定量关系研究[J].土壤学报,2019,56(2):487-494.

[23] 张怀志,唐继伟,袁硕,等.化肥减施对日光温室越冬长茬番茄氮肥利用率及去向的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(7):1295-1302.

[24] Zhong Y M, Wang X P, Yang J P, et al. Tracing the fate of nitrogen with ¹⁵N isotope considering suitable fertilizer rate related to yield and environment impacts in paddy field [J]. Paddy and Water Environment, 2017,15(4):943-949.

[25] 吴永成,王志敏,周顺利.¹⁵N 标记和土柱模拟的夏玉米氮肥利用特性研究[J].中国农业科学,2011,44(12):2446-2453.

[26] 戴良香,张智猛,张冠初,等.氮肥用量对花生氮素吸收与分配的影响[J].核农学报,2020,34(2):370-375.

[27] Shi Z L, Jing Q, Cai J, et al. The fates of ¹⁵N fertilizer in relation to root distributions of winter wheat under different N splits [J].European Journal of Agronomy, 2012,40:86-93.

[28] 朱宝国,韩旭东,张春峰,等.氮肥深追可提高玉米¹⁵N 的吸收、分配及利用[J].植物营养与肥料学报,2016,22(6):1696-1700.

[29] 李鹏程,郑苍松,孙森,等.利用¹⁵N 示踪研究不同肥力土壤棉花氮肥减施的产量与环境效应[J].植物营养与肥料学报,2017,23(5):1199-1206.

(上接第 343 页)

[14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.

[15] 杨云马,孙彦铭,贾良良,等.磷肥施用深度对夏玉米产量及根系分布的影响[J].中国农业科学,2018,51(8):1518-1526.

[16] Zhang F S, Shen J B, Jing J Y, et al. Rhizosphere processes and management for improving nutrient use efficiency and crop productivity [J]. Advances in Agronomy,2010,107:1-32.

[17] 张德闪,李洪波,申建波.集约化互作体系植物根系高效获取土壤养分的策略与机制[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1547-1555.

[18] Li H B, Ma Q H, Li H G, et al. Root morphological responses to localized nutrient supply differ among crop species with contrasting root traits [J].Plant and Soil,2014,376:151-163.

[19] Shen J B, Yuan L X, Zhang J L, et al. Phosphorus dynamics: From soil to plant [J].Plant Physiology,2011,156(3):997-1005.

[20] 范秀艳,杨恒山,高聚林,等.超高产栽培下磷肥运筹对春玉米根系特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(3):562-570.

[21] Bardgett R D, Mommer L, Vries F. Going underground: Root traits as drivers of ecosystem processes [J].Trends in Ecology and Evolution,2014,29(12):692-699.

[22] Reich P B, Cornelissen H. The world-wide ‘fast-slow’ plant economics spectrum: A traits manifesto [J]. Journal of Ecology,2014,102(2):275-301.

[23] 杨建昌.水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系[J].中国农业科学,2011,44(1):36-46.

[24] 尹飞,王俊忠,孙笑梅,等.夏玉米根系与土壤硝态氮空间分布吻合度对水氮处理的响应[J].中国农业科学,2017,50(11):2166-2178.

[25] 张瑞富,杨恒山,范秀艳,等.施磷深度和深松对春玉米磷素吸收与利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(4):880-887.

[26] Einsmann J C, Jones R H, Pu M, et al. Nutrient foraging traits in 10 co-occurring plant species of contrasting life forms [J].Journal of Ecology,1999,87:609-619.

[27] 路永莉,白风华,杨宪龙,等.水肥一体化技术对不同生态区果园苹果生产的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(11):1281-1288.

[28] 杜一超,蔡耀辉,张林,等.葡萄分层地下滴灌滴头布设深度优化[J].排灌机械工程学报,2021,39(6):615-621.

[29] 王静,叶壮,褚贵新.水磷一体化对磷素有效性及磷肥利用率的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(11):1377-1383.