

# 华北平原玉米种植中施入氮肥的去向研究

张妍<sup>1,2</sup>, 李发东<sup>3,4</sup>, 时鹏<sup>5</sup>, 韦安磊<sup>1</sup>

(1. 西北大学城市与环境学院, 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127;

2. 中科院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;

4. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190; 5. 西安理工大学, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 西安 710048)

**摘要:** 为了定量研究玉米氮肥利用特性以及肥料氮的去向, 设计了<sup>15</sup>N 标记微区控制试验, 设置 3 个施氮水平: 不施氮肥(对照)、低氮处理(120 kg N/hm<sup>2</sup>)和高氮处理(240 kg N/hm<sup>2</sup>)。结果表明: 土壤中残留<sup>15</sup>N 量随施氮量增加而显著增加( $P < 0.05$ )。在空间分布上, 总体呈现出随土壤深度先下降后上升的趋势, 高氮处理和低氮处理<sup>15</sup>N 累积量均以 40—60 cm 和 60—80 cm 土层最多, 这两层残留<sup>15</sup>N 总量分别占总投入量的 37.55% 和 18.99%。与对照相比, 施氮处理均显著提高了玉米地上、地下生物量和籽粒产量以及各部分吸氮量。虽然高氮处理较低氮处理施氮量增加了 1 倍, 但籽粒产量仅增加 0.14 倍。氮肥农学效率与氮肥表观利用率随着施氮量增加而显著降低。高氮处理和低氮处理中玉米对<sup>15</sup>N 标记氮肥的利用率分别为 28.86% 和 31.15%, 土壤氮残留率分别为 50.42% 和 36.52%, 当季进入地下水的比率分别为 4.27% 和 0.68%, 其他损失率分别为 16.45% 和 32.33%。研究结果表明, 施氮量为 120 kg/hm<sup>2</sup> 可有效增加玉米产量, 同时提高氮肥利用率, 减少土壤氮累积, 减小氮肥施用产生的环境污染风险。

**关键词:** 玉米; <sup>15</sup>N 标记技术; 氮肥利用; 残留; 损失率

**中图分类号:** S19; S513

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2018)04-0210-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.04.033

## Study on the Fate of Nitrogen Fertilizer Applied to Maize Cropping System in the North China Plain

ZHANG Yan<sup>1,2</sup>, LI Fadong<sup>3,4</sup>, SHI Peng<sup>5</sup>, WEI Anlei<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing

100101; 4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190;

5. State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

**Abstract:** The <sup>15</sup>N-label technique was employed in the maize field to quantify the nitrogen fertilizer utilization and its fate. The experiment was designed with three nitrogen fertilizer application rates (0, 120, 240 kg/hm<sup>2</sup>), and three replications were set up in each treatment. Results showed that soil residual <sup>15</sup>N increased significantly with the increasing of nitrogen fertilizer application ( $P < 0.05$ ). For the spatial distribution, soil residual <sup>15</sup>N showed a trend of decreasing first and then rising, and the accumulation of <sup>15</sup>N in 40—60 cm and 60—80 cm soil layers were the maximum in both high nitrogen treatment (240 kg/hm<sup>2</sup>) and low nitrogen treatment (120 kg/hm<sup>2</sup>), and the residual <sup>15</sup>N in these two soil layers accounted for 37.55% and 18.99% of the total input amount, respectively. Compared with the control, application of nitrogen fertilizer significantly improved the dry matter, grain yield and total nitrogen uptake rate of different parts of maize. Although the nitrogen application rate of high nitrogen treatment increased by 1 times compared with the low nitrogen treatment, the grain yield increased only 0.14 times. The agronomic efficiency and the apparent utilization rate of nitrogen fertilizer decreased significantly with the increasing of nitrogen application rate. The utilization rates of nitrogen

收稿日期: 2018-02-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(41601017, 41771292, 51208424); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放课题基金项目(A314021402-1618); 陕西省教育厅科研计划项目(15JK1762); 陕西省自然科学基金基础研究项目(2017JQ4001)

第一作者: 张妍(1986—), 女, 讲师, 主要从事农业生态水循环与环境氮污染研究。E-mail: yanz@nwu.edu.cn

通信作者: 李发东(1972—), 男, 研究员, 主要从事农业生态水水文环境与环境氮污染研究。E-mail: lifadong@igsnr.ac.cn

fertilizer labeled by  $^{15}\text{N}$ , the soil nitrogen residual rates, the proportion of leaching loss into groundwater and the other loss rates were 28.86%, 50.42%, 4.27% and 16.45% in the high nitrogen treatment, respectively, while these values of low nitrogen treatment were 31.15%, 36.52%, 0.68% and 32.33%, respectively. All these results showed that the nitrogen application of  $120\text{ kg/hm}^2$  would be favorable to improve grain yield and nitrogen use efficiency, and reduce residual nitrogen rate in soil. Therefore, this nitrogen application rate was suggested to lighten the environment pollution risk.

**Keywords:** maize;  $^{15}\text{N}$ -label techniques; nitrogen fertilizer utilization; residue; loss ratio

氮肥施用是确保作物产量稳定增长的重要措施,然而农田生态系统中过量施入氮素肥料,由于低利用率造成氮素大量损失,不利于现代农业生产的发展<sup>[1]</sup>。同时,农田氮素的淋洗损失、氨挥发损失等带来严重的环境污染<sup>[2-3]</sup>。目前,人口和耕地面积约占中国 1/5 的华北平原氮肥用量为  $200\sim 400\text{ kg/hm}^2$ <sup>[4]</sup>,平均当季氮利用率只有  $30\%\sim 35\%$ ,远低于发达国家 50% 的水平<sup>[5]</sup>。华北平原属灌溉农作体系,玉米对氮素吸收量具有一定阈值,所以玉米高量生产中普遍存在氮肥施用过量问题,导致氮肥利用率低下。因此,深入探讨农田系统不同施氮条件下玉米对氮素吸收利用特性及其损失途径,可为我国精准农业发展提供科学依据,同时也可缓解面源污染产生的严重环境问题<sup>[6-8]</sup>。

研究<sup>[9-10]</sup>表明,施用氮肥对玉米籽粒有显著的增产作用,同时玉米植株吸氮量也随之显著增加。然而,各土层中的氮残留量随施氮量的增多而显著增加,残留率为  $29.61\%\sim 56.32\%$ <sup>[11]</sup>。在农田土壤中施入氮肥后,氮素在土壤中的去向大致可分为 3 个部分:一是经化学作用,部分氮素转变为有效养分被作物吸收利用;二是经土壤理化作用,部分氮素被固定在土壤矿物晶格中,从而残留于土壤中;三是经淋洗、硝化和反硝化等方式损失掉。氮肥的当季利用率是决定氮肥增产效果的主要因素。提高氮肥当季利用的关键是确定合理的氮肥用量,并减少其施入农田后的损失<sup>[12]</sup>。土壤硝酸盐的淋洗损失是氮素主要的损失途径之一<sup>[13]</sup>,主要受灌溉与降水、土壤特性、氮肥种类和氮肥施用量等多种因素的影响<sup>[14]</sup>。杨蕊菊等<sup>[15]</sup>研究了施氮对玉米地土壤硝态氮分布及累积的影响,结果表明土壤硝态氮累积量随施氮量的增加而增加,硝态氮的累积主要集中在  $0\sim 60\text{ cm}$  土壤深度;Zhou 等<sup>[16]</sup>的研究结果表明,玉米种植中  $0\sim 4\text{ m}$  深度土壤中总硝酸盐累积可达  $749\text{ kg/hm}^2$ ,华北平原降雨量多集中在  $6\sim 9$  月,地下水位较低,土壤中残留的氮极易随水体脱离根区,向深层迁移直接进入浅层地下水<sup>[17]</sup>。尽管目前围绕玉米的氮肥利用特性及其去向已开展了一定的研究,但大多采用  $^{15}\text{N}$  标记技术的土柱室内模拟试验,且多用的氮肥类型为尿素和氨氮<sup>[9-10, 18]</sup>,而硝态氮在土壤中易随水移动扩散,针对

农田系统植株对硝态氮肥利用特性以及残留氮素向地下水中迁移特征的研究尚缺乏。本文利用  $^{15}\text{N}$  标记微区试验来研究不同氮肥施用量条件下土壤氮的空间分布特点,阐明玉米对氮素的吸收利用特征,定量揭示整个体系中氮的去向,旨在为玉米的合理施肥提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

本试验于 2013 年 8 月 3 日至 10 月 8 日在中国科学院禹城综合试验站进行。试验站位于华北平原中部地区( $36^{\circ}40'\sim 37^{\circ}12'\text{N}$ ,  $116^{\circ}22'\sim 116^{\circ}45'\text{E}$ ),海拔  $21.3\text{ m}$ 。该地区属暖温带半湿润季风气候,光热资源丰富,雨热同期,多年平均气温  $13.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,降水量  $582\text{ mm}$ ,太阳辐射总量  $5\,225\text{ MJ/m}^2$ ,年日照时间  $2\,640\text{ h}$ ,气候条件有利于农业生产,主要种植作物为玉米和小麦。地貌类型为黄河冲积平原,土壤母质为黄河冲积物,以潮土和盐化潮土为主,土壤质地为轻一中壤土。地下水埋深浅,一般在  $0.8\sim 4.0\text{ m}$ ,地下水资源丰富。通过气象站采集降雨数据,试验期间研究区共有 5 场降雨,其中 8 月 12 日和 8 月 13 日降水量较多,分别为  $53.5, 57.8\text{ mm}$ ,而其他场次降雨量较少。

### 1.2 试验设计

供试验土壤为轻壤土,试验之前测定其基本理化性质。土壤 pH 测定水土比为  $2.5:1$ ;土壤有机碳采用重铬酸钾容量法测定;土壤全氮采用元素分析仪(Vario EL III, 德国)测定;土壤全磷采用高氯酸—硫酸法测定;土壤全钾采用酸溶法提取,原子吸收分光光度法测定。试验测定表明,土壤 pH  $8.20$ ,有机碳含量  $5.97\text{ g/kg}$ ,全氮含量  $0.79\text{ g/kg}$ ,全磷含量  $0.88\text{ g/kg}$ ,全钾含量  $9.48\text{ g/kg}$ 。将土壤装入深度为  $80\text{ cm}$ ,直径为  $60\text{ cm}$  的不锈钢桶进行  $^{15}\text{N}$  标记微区控制试验。桶底层埋陶土管便于收集下渗水。

夏玉米品种为郑单 958,于 2013 年 8 月 3 日播种,每桶播种 2 颗(图 1)。试验设置 3 个氮用量处理,即不施氮肥(对照)、低施氮处理( $120\text{ kg/hm}^2$ )和高施氮处理( $240\text{ kg/hm}^2$ ),分别用  $\text{N}_0$ 、 $\text{N}_{120}$  和  $\text{N}_{240}$  表示,每个处理 3 次重复。氮肥使用上海稳定性同位素工程技术研究中心提供的  $^{15}\text{N}$  标记的丰度为  $10\%$ 、纯

度为 98.5% 的  $\text{Na}^{15}\text{NO}_3$ 。氮肥分两次施用,即总用量的 40% 作基肥,于种植前一天施用,剩余 60%  $\text{Na}^{15}\text{NO}_3$  在大喇叭口时期作追肥。磷钾肥用作基肥,施用的肥料分别为过磷酸钙( $\text{P}_2\text{O}_5$  12%)和硫酸钾( $\text{K}_2\text{O}$  50%),用量与大田相同,分别为 120,80  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。灌溉方式与大田相同,在玉米播种前(7 月 30 日)和玉米穗期(8 月 28 日)各灌溉 1 次,灌溉用水为蒸馏水,每次灌溉水量 10 mm。

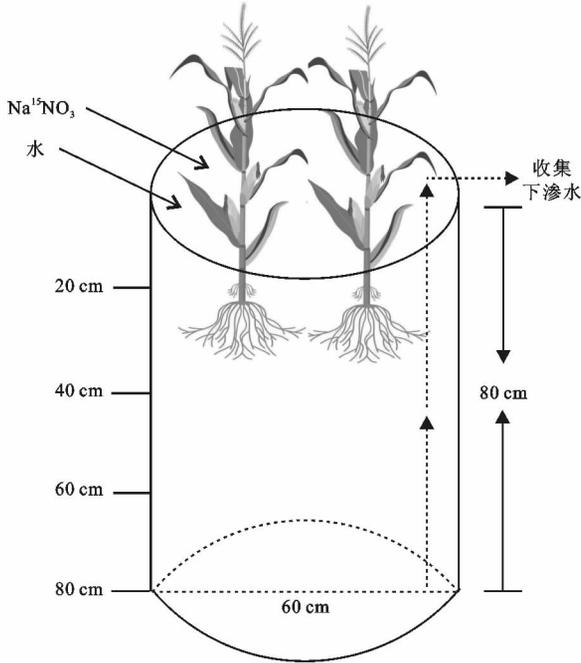


图 1  $^{15}\text{N}$  标记微区控制试验示意

### 1.3 样品采集与分析

玉米成熟后,用土钻采集土层深度为 0—5, 5—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—60, 60—80 cm 的土壤各 200 g, 土壤样品风干后研磨,过 80 目筛,采用 MAT-253 质谱仪测定  $^{15}\text{N}$  同位素。收集玉米根、茎、叶和籽粒样品,杀青后烘干,分别称重,计算每部分的生物量。植物样粉碎后采用 MAT-253 质谱仪分析测定  $^{15}\text{N}$  同位素丰度。另外在玉米生育期内每次下雨和灌溉之后抽取底层下渗水,记录水量,并采用 MAT-253 质谱仪测定水样中  $^{15}\text{N}$  丰度。

### 1.4 数据分析

土壤各层  $^{15}\text{N}$  残留率表示土壤各层残留的  $^{15}\text{N}$  占总投入量的百分比,植物各  $^{15}\text{N}$  利用率表示植物吸收的  $^{15}\text{N}$  占总投入量的百分比。相关计算公式为:

$$\text{土壤各层}^{15}\text{N 残留率}(\%) = \frac{\text{各层}^{15}\text{N 原子百分超} \times \text{土壤质量}}{\text{标记}^{15}\text{N 的量}} \times 100\%$$

$$\text{植物}^{15}\text{N 利用率}(\%) = \frac{\text{植物}^{15}\text{N 原子百分超} \times \text{吸氮量}}{\text{标记}^{15}\text{N 的量}} \times 100\%$$

$$\text{氮肥生理利用效率} = \frac{\text{施氮处理籽粒产量} - \text{对照籽粒产量}}{\text{施氮处理植株总吸氮量} - \text{对照植株总吸氮量}}$$

$$\text{氮肥农学效率} = \frac{\text{施氮处理籽粒产量} - \text{对照籽粒产量}}{\text{施氮量}}$$

$$\text{氮肥表观利用率} = \frac{\text{施氮处理植株总吸氮量} - \text{对照植株总吸氮量}}{\text{施氮量}} \times 100\%$$

采用 Excel 2010、SPSS 16.0 等软件进行数据的统计和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 标记 $^{15}\text{N}$ 在土壤中的垂直空间分布

氮肥施入土壤后,在不同的土层深度中呈现一定的残留规律。从表 1 可以看出,纵观整个土壤剖面,  $\text{N}_{120}$  和  $\text{N}_{240}$  处理各土层中的残留  $^{15}\text{N}$  量在空间分布总体表现为随土壤深度先下降后上升的趋势,  $^{15}\text{N}$  累积量以 40—60 cm 土层累积量最多,其次是 60—80 cm 土层,这两层残留  $^{15}\text{N}$  量分别占总残留量的 49.98% 和 74.47%, 占总投入量的 18.99% 和 37.55%。5—10, 10—20, 20—30 cm 土层  $^{15}\text{N}$  残留量较少,分别仅占总残留量的 3.58%~8.78%, 1.30%~9.26% 和 2.02%~6.54%。这可能与氮随水分向下迁移以及玉米根系主要吸收表层土壤的氮有关<sup>[19]</sup>。

施氮量是影响氮肥残留的重要因素。随着施氮量的增加,0—5, 30—40, 40—60, 60—80 cm 土层中  $^{15}\text{N}$  残留量显著增加( $P < 0.05$ )。杜红霞等<sup>[20]</sup>研究也表明,当施氮量  $> 120 \text{ kg}/\text{hm}^2$  时,玉米收获后土壤硝态氮含量显著增加。由于作物的吸氮量有限,因此残留在土壤中的氮素总体随施氮量的增加而增加<sup>[18]</sup>。巨晓棠等<sup>[21]</sup>指出,我国目前玉米的推荐施氮量为 150~250  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,但是已经造成了明显的土壤硝酸盐累积。本研究中,经过一个玉米生长季后,  $\text{N}_{120}$  和  $\text{N}_{240}$  施氮处理 0—80 cm 土体土壤中  $^{15}\text{N}$  残留总量分别为 123.86, 341.98 mg, 各占  $^{15}\text{N}$  总投入量的 36.52% 和 50.42%, 差异达到显著水平( $P < 0.01$ )。氮肥施用过量,会深刻影响土壤中的氮素残留量。因此,推荐合适的氮肥施用量,可以有效控制土壤中的残留硝态氮,从而有效降低硝态氮的淋洗作用。

表 1 夏玉米成熟期不同土壤层次中残留  $^{15}\text{N}$  及分布

土层深度/cm	各层 $^{15}\text{N}$ 残留量/mg		各层 $^{15}\text{N}$ 占总残留量比例/%		各层 $^{15}\text{N}$ 占总投入量比例/%	
	$\text{N}_{120}$	$\text{N}_{240}$	$\text{N}_{120}$	$\text{N}_{240}$	$\text{N}_{120}$	$\text{N}_{240}$
0—5	14.94a	32.81b	11.59	9.59	4.41	4.84
5—10	11.32a	12.25a	8.78	3.58	3.34	1.81
10—20	11.93a	4.45b	9.26	1.30	3.52	0.66
20—30	8.43a	6.90a	6.54	2.02	2.49	1.02
30—40	12.82a	30.88b	9.95	9.03	3.78	4.55
40—60	34.60a	141.04b	26.85	41.24	10.20	20.79
60—80	29.81a	113.65b	23.13	33.23	8.79	16.76
0—80	123.86a	341.98b	100.00	100.00	36.52a	50.42b

注:同行不同字母表示不同施氮处理之间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

### 2.2 不同施氮条件下夏玉米产量及其氮吸收利用

从表 2 可以看出,  $\text{N}_0$ 、 $\text{N}_{120}$  和  $\text{N}_{240}$  处理 0—20 cm

深度根生物量分别为 12.40, 31.29, 40.41 g; 20—40 cm 土层深度, 玉米根分布较少, 3 种施氮处理的平均根生物量分别为 0.62 g(N<sub>0</sub>), 1.86 g(N<sub>120</sub>), 2.31 g(N<sub>240</sub>)。地上部分生物量 N<sub>240</sub> 略高于 N<sub>120</sub>, 较对照增加了 1~2 倍。与对照(N<sub>0</sub>)相比, 施氮处理均显著提高了玉米单株生物量和籽粒产量(P<0.05)。说明施氮有利于作物生长, 提高了玉米产量。随着施氮量的增加, N<sub>240</sub> 处理籽粒产量较 N<sub>120</sub> 处理增加了 1.14 倍, 但增产效果不显著, 说明虽然氮肥施用增加了 1 倍, 而目标产量只增加了不到 1/5。目前, 华北平原氮肥用量较 90 年代增加了 1.58 倍, 而粮食产量仅增加了 0.7 倍<sup>[22]</sup>。张宏<sup>[23]</sup>指出施氮量 120, 240 kg/hm<sup>2</sup> 可以显著提高玉米产量和水分利用效率, 但两种施肥处理之间产量和水分利用效率差异不大, 而继续增加氮肥用量则降低了氮肥的利用效率, 增加了氮素流失产生的环境污染风险。因此, 120 kg/hm<sup>2</sup> 为氮肥的建议施用量。

氮肥施用影响玉米的氮素累积, 同时不同器官氮素的累积量出现明显的差异, 总体表现为籽粒>地上生物量>根系。玉米各部位氮累积量均随氮肥施用量的增加而增加, 总体趋势表现为 N<sub>240</sub>>N<sub>120</sub>>N<sub>0</sub>(表 2)。上层根系对氮的累积量显著高于下层根系, N<sub>0</sub>、N<sub>120</sub> 和 N<sub>240</sub> 处理玉米上下层根吸氮量比值分别为 17, 17.64 和 22.44。玉米籽粒氮素累积一般高于其他器官, N<sub>120</sub> 和 N<sub>240</sub> 处理每株玉米籽粒氮累积量分别为 2.277, 2.864 g, 比对照籽粒氮素分别增加了 1.03, 1.56 倍。

表 2 不同施氮量条件下玉米各部分生物量、氮累积量和吸收<sup>15</sup>N 量

植物器官	处理	单株	单株氮	单桶 <sup>15</sup> N
		生物量/g	累积量/g	吸收量/mg
根 10~20 cm	N <sub>0</sub>	12.40a	0.051a	—
	N <sub>120</sub>	31.29b	0.300b	6.54a
	N <sub>240</sub>	40.41c	0.561c	17.20b
根 20~40 cm	N <sub>0</sub>	0.62a	0.003a	—
	N <sub>120</sub>	1.86b	0.017b	0.35a
	N <sub>240</sub>	2.31c	0.025b	0.78b
地上部分	N <sub>0</sub>	141.23a	1.088a	—
	N <sub>120</sub>	200.45b	2.372b	47.76a
	N <sub>240</sub>	218.38c	2.750b	79.46b
籽粒	N <sub>0</sub>	106.47a	1.120a	—
	N <sub>120</sub>	120.35b	2.277b	50.98a
	N <sub>240</sub>	137.05b	2.864c	98.31b

N<sub>240</sub> 和 N<sub>120</sub> 处理籽粒吸收<sup>15</sup>N 量分别为 98.31, 50.98 mg/桶(表 2)。随着施肥量的增加, 玉米各部位器官<sup>15</sup>N 吸收量也显著增加。N<sub>240</sub> 处理玉米 10~20, 20~40 cm 根系、地上部分和籽粒<sup>15</sup>N 吸收量约为 N<sub>120</sub> 处理对应器官<sup>15</sup>N 吸收量的 2~3 倍。

氮素利用效率是确定氮效率的有效指标。由表 3 可知, N<sub>240</sub> 和 N<sub>120</sub> 处理的玉米氮肥生理利用效率分别为 15.53, 12.27 kg/kg, 处理间差异不显著。氮肥农学效率与氮肥表观利用率随着施氮量增加而显著

降低。N<sub>240</sub> 处理较 N<sub>120</sub> 处理氮肥农学效率和氮肥表观利用率分别下降 7.35 kg/kg 和 17.06%。Baram 等<sup>[14]</sup>研究表明, 与低供氮量相比, 高供氮量下玉米的氮吸收效率和利用效率均呈现下降趋势。与当地常规施氮量(240 kg/hm<sup>2</sup>)相比, 减量施氮处理下玉米产量、经济系数、收获指数以及氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率显著提高, 同时土壤氮贡献率降低<sup>[24]</sup>。

表 3 不同施氮量处理玉米的氮肥利用特性

处理	氮肥生理利用效率/	氮肥农学效率/	氮肥表观	<sup>15</sup> N
	(kg·kg <sup>-1</sup> )	(kg·kg <sup>-1</sup> )	利用率/%	利用率/%
N <sub>120</sub>	12.27a	16.37a	79.74a	31.15a
N <sub>240</sub>	15.53a	9.02b	62.68b	28.86a

根据<sup>15</sup>N 总投入量, 估算出 N<sub>240</sub> 和 N<sub>120</sub> 处理玉米<sup>15</sup>N 利用率分别为 28.86% 和 31.15%。世界各地农田氮肥利用率普遍低于 50%, 而华北平原作物氮肥利用率只有 16%~41%<sup>[22]</sup>。潘家荣等<sup>[25]</sup>发现在施氮量为 120~360 kg/hm<sup>2</sup> 条件下, 华北平原的夏玉米氮肥利用率为 26.5%~51.1%。侯云鹏等<sup>[26]</sup>研究表明, 玉米的氮肥利用率随施氮量的增加而降低。氮素利用率的降低主要归因于氮素的供应量远大于作物对氮素的吸收量<sup>[27]</sup>。未被植物吸收的氮残留在土壤中, 易随着降雨和灌溉淋洗到地下水中, 造成地下水硝酸盐污染。本研究中, 结合两种氮肥施用量下的作物产量以及对氮的吸收利用情况来看, N<sub>120</sub> 处理玉米对氮肥的吸收利用特性较好, 同时有利于减少氮的损失。

### 2.3 不同施氮处理下标记<sup>15</sup>N 的归趋

一般情况下农田氮素的去向包括:(1)作物的吸收;(2)土壤残留;(3)其他损失(硝化与反硝化、氮挥发、径流和淋失等)<sup>[12]</sup>。本研究中, N<sub>240</sub> 和 N<sub>120</sub> 处理玉米对<sup>15</sup>N 标记氮肥吸收量分别为 195.75, 105.63 mg, 利用率分别为 28.86% 和 31.15%。土壤<sup>15</sup>N 残留总量分别为 341.98, 123.86 mg(表 4), 分别占<sup>15</sup>N 总投入量的 50.42% 和 36.52%(表 1)。下渗水<sup>15</sup>N 量分别为 28.93, 2.32 mg(表 4), 当季淋失率(下渗水<sup>15</sup>N 量占总投入量的百分比)为 4.27% 和 0.68%。<sup>15</sup>N 的其他损失量分别为 111.58, 107.31 mg, 损失率为 16.45% 和 31.64%。由此可见, 随着施氮量的增加, 作物对氮肥的利用率下降; 氮肥残留量增多, 残留率增加; 当季淋失量增多, 淋失率增加。

在干旱地区, 玉米生育期内氮肥的损失途径与降水和氮肥用量关系密切<sup>[14]</sup>。由于夏玉米生长季节水热条件较好, 有利于土壤有机氮矿化, 氮素供应常常过量, 同时降雨量大, 强度高, 因此硝态氮的淋溶损失可能是夏玉米生长季内氮素损失的主要途径之一<sup>[28]</sup>。本研究中, N<sub>240</sub> 处理比 N<sub>120</sub> 处理当季进入地下水的<sup>15</sup>N 高出 25.59 mg, N<sub>240</sub> 处理淋失率是 N<sub>120</sub> 的 6.28 倍。土壤中<sup>15</sup>N 残留量随施氮量的增多而显

著增加,  $N_{240}$  处理和  $N_{120}$  处理总  $^{15}N$  残留率分别为 50.42% 和 36.52%, 空间分布上总体表现出随土壤层次加深先减小后增加的趋势。华北平原降雨主要集中在 6—9 月内, 强度大的降雨不仅会引起氮素的地表径流损失, 还会使表层的确态氮下渗<sup>[29]</sup>, 由于华北平原地下水埋深浅, 导致土壤中的硝酸盐大量进入地下水。研究<sup>[30]</sup>表明, 华北平原玉米季氮肥损失高达 151 kg/hm<sup>2</sup>, 占总氮肥用量的 59%。中国北方地区玉米生产中通过硝酸盐淋失、挥发和反硝化途径损失的氮比例分别为 12.1%~21.3%, 11.0%~24.7% 和 0.9%~10.9%<sup>[27]</sup>。相比较而言,  $N_{120}$  的施肥量较  $N_{240}$  的施肥量可以有效增加玉米增产, 同时可减少环境风险。但是, 由于氮肥利用率普遍较低, 在未来的研究中需要重点关注提高氮肥利用效率, 明确控制氮的主要损失途径, 降低氮肥施用产生的面源污染。

表 4 标记  $^{15}N$  的投入与损失 单位: mg

处理	$^{15}N$ 总输入量	$^{15}N$ 植物回收量	$^{15}N$ 土壤残留量	$^{15}N$ 进入地下水量	其他损失量
$N_{120}$	339.12	105.63	123.86	2.32	107.31
$N_{240}$	678.24	195.75	341.98	28.93	111.58

### 3 结论

(1) 氮肥施用显著影响土壤氮素的残留。0—80 cm 土壤剖面  $^{15}N$  残留量随施氮量增加而显著增加 ( $P < 0.05$ ), 土壤中残留  $^{15}N$  量均随土层深度先下降后上升,  $^{15}N$  累积量以 40—60, 60—80 cm 深度较多。

(2) 氮肥施用影响玉米各器官的氮肥的利用效率。不同施肥量处理中玉米籽粒产量、各部分生物量和氮累积量都随氮肥施用量增加而增加。高施氮量处理 ( $N_{240}$ ) 籽粒产量和氮肥生理利用效率与低施氮量处理 ( $N_{120}$ ) 差异不明显。氮肥农学效率与氮肥表观利用率随着施氮量增加而显著降低,  $N_{240}$  处理较  $N_{120}$  处理氮肥农学效率下降 7.35 kg/kg, 氮肥表观利用率下降 17.06%。

(3) 由于作物对氮肥的利用率较低, 随着施氮量的增加, 作物对氮肥的利用率下降, 增加了氮肥残留量, 导致当季氮素淋失量增加。通过本试验的研究, 120 kg N/hm<sup>2</sup> 的氮肥施用量较为合适。

#### 参考文献:

[1] Tian D S, Niu S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(2): e024019.

[2] Li R F, Ruan X H, Bai Y, et al. Effect of wheat-maize straw return on the fate of nitrate in groundwater in the Huaihe River Basin, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 592: 78-85.

[3] Marouane B, Dahchour A, Dousset S, et al. Monitoring of nitrate and pesticide pollution in Mnasra, Morocco soil and groundwater[J]. Water Environment Research,

2015, 87(6): 567-575.

[4] 张宇, 李云开, 欧阳志云, 等. 华北平原冬小麦—夏玉米生产灰水足迹及其县域尺度变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6647-6654.

[5] Wang H, Zheng H, Jiang Z, et al. Efficacies of biochar and biochar-based amendment on vegetable yield and nitrogen utilization in four consecutive planting seasons[J]. Science of the Total Environment, 2017, 593: 124-133.

[6] Chen S F, Sun C C, Wu W L, et al. Water leakage and nitrate leaching characteristics in the winter wheat-summer maize rotation system in the North China Plain under different irrigation and fertilization management practices[J]. Water, 2017, 9(2): 141.

[7] Yan P, Pan J X, Zhang W J, et al. A high plant density reduces the ability of maize to use soil nitrogen[J]. PLoS One, 2017, 12(2): e0172717.

[8] Zheng W K, Liu Z G, Zhang M, et al. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system[J]. Field Crops Research, 2017, 205: 106-115.

[9] Yan P, Zhang Q, Shuai X F, et al. Interaction between plant density and nitrogen management strategy in improving maize grain yield and nitrogen use efficiency on the North China Plain[J]. The Journal of Agricultural Science, 2016, 154(6): 978-988.

[10] 任佰朝, 范霞, 董树亭, 等. 种植密度和施氮量对不同株高夏玉米产量和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 269-277.

[11] 左红娟. 基于高丰度  $^{15}N$  的肥料去向及利用率研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.

[12] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 192-197.

[13] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(9): 3041-3046.

[14] Baram S, Couvreur V, Harter T, et al. Estimating nitrate leaching to groundwater from orchards: Comparing crop nitrogen excess, deep vadose zone data-driven estimates, and HYDRUS modeling[J]. Vadose Zone Journal, 2016, 15(11): 1-13.

[15] 杨蕊菊, 柴守玺, 马忠明. 施氮量对小麦/玉米带田土壤水分及硝态氮的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7905-7912.

[16] Zhou J, Gu B, Schlesinger W H, et al. Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 25088.

[17] Zhang Y, Li F D, Zhang Q Y, et al. Tracing nitrate pollution sources and transformation in surface- and ground-waters using environmental isotopes[J]. Science of the Total Environment, 2014, 490: 213-222.

- [18] Cambouris A N, Ziadi N, Perron I, et al. Corn yield components response to nitrogen fertilizer as a function of soil texture[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2016, 96(4): 386-399.
- [19] 范霞, 张吉旺, 任伯朝, 等. 不同株高夏玉米品种的氮素吸收与利用特性[J]. *作物学报*, 2014, 40(10): 1830-1838.
- [20] 杜红霞, 吴普特, 冯浩, 等. 氮施用量对夏玉米土壤水氮动态及水肥利用效率的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(4): 82-87.
- [21] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 281-296.
- [22] 张婧, 李虎, 朱国梁, 等. 控释肥施用对土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响: 以华北平原冬小麦/夏玉米轮作系统为例[J]. *生态学报*, 2017, 37(22): 7624-7635.
- [23] 张宏. 半旱地不同栽培模式下小麦—玉米轮作体系作物水肥利用特性研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [24] 雍太文, 刘小明, 刘文钰, 等. 减量施氮对玉米—大豆套作体系中作物产量及养分吸收利用的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 474-482.
- [25] 潘家荣, 巨晓棠, 刘学军, 等. 水氮优化条件下在华北平原冬小麦/夏玉米轮作中化肥氮的去向[J]. *核农学报*, 2009, 23(2): 334-340, 307.
- [26] 侯云鹏, 孔丽丽, 秦裕波, 等. 吉林省中部黑土区玉米氮肥效应研究[J]. *玉米科学*, 2012(3): 130-133, 138.
- [27] Zhang X, Bol R, Rahn C, et al. Agricultural sustainable intensification improved nitrogen use efficiency and maintained high crop yield during 1980—2014 in Northern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 596: 61-68.
- [28] 吴永成, 王志敏, 周顺利. <sup>15</sup>N 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.
- [29] Huang P, Zhang J B, Zhu A N, et al. Nitrate accumulation and leaching potential reduced by coupled water and nitrogen management in the Huang-Huai-Hai Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610/611: 1020-1028.
- [30] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924.

(上接第 203 页)

- [22] Yazawa Y, Asakawa D, Matsueda D, et al. Effective carbon and nitrogen sequestrations by soil amendments of charcoal[J]. *Journal of Arid Land Studies*, 2006, 15(4): 463-467.
- [23] 李燕青. 不同类型有机肥与化肥配施的农学和环境效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [24] 张国荣, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 543-551.
- [25] Yadav R L, Dwivedi B S, Prasad K, et al. Yield trends, and changes in soil organic-C and available NPK in a long-term rice-wheat system under integrated use of manures and fertilisers[J]. *Field Crops Research*, 2000, 68(3): 219-246.
- [26] 李春明, 熊淑萍, 赵巧梅, 等. 有机无机肥配施对小麦冠层结构、产量和蛋白质含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(12): 4287-4293.
- [27] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2008(10): 3133-3139.
- [28] 周江明. 有机—无机肥配施对水稻产量、品质及氮素吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 234-240.
- [29] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(8): 2809-2819.

(上接第 209 页)

- [16] Sharma V, Hussain S, Sharma K R, et al. Labile carbon pools and soil organic carbon stocks in the foothill Himalayas under different land use systems[J]. *Geoderma*, 2014, S232/234(12): 81-87.
- [17] 胡振宏, 何宗明, 范少辉, 等. 采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应[J]. *生态学报*, 2013, 33(13): 4205-4213.
- [18] 王芳丽, 高明, 代文才, 等. 不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 227-232.
- [19] 盛卫星, 吴家森, 徐建春, 等. 不同经营年限对山核桃林地土壤轻重组有机碳的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2015, 32(5): 803-808.
- [20] 曲晓晶, 吴景贵, 李建明, 等. 外源有机碳对黑土有机碳及颗粒有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 278-286.
- [21] 郑永红, 胡友彪, 张治国, 等. 煤矿复垦区重构土壤溶解性有机碳空间分布特征[J]. *土壤*, 2017, 49(5): 977-981.
- [22] 吴玉红, 郝兴顺, 田霄鸿, 等. 秸秆还田对汉中盆地稻田土壤有机碳组分、碳储量及水稻产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 325-331.
- [23] 梁利宝, 冯鹏艳. 生物炭与有机肥、无机肥配施对采煤塌陷区复垦土壤理化性状的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 305-308.
- [24] 梁利宝, 闫峰, 许剑敏. 不同培肥处理对采煤塌陷区复垦土壤氮素形态的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 262-266.