

不同管理方式对夏玉米氮素吸收、分配及去向的影响

徐明杰¹, 张琳¹, 汪新颖¹, 彭亚静¹, 张丽娟^{1,2*}, 巨晓棠³

(1 河北农业大学资源与环境学院, 河北保定 071000; 2 河北省农田生态环境重点实验室, 河北保定 071000;

3 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:【目的】本文利用¹⁵N 同位素示踪技术探讨传统(CT)和优化(YH)两种管理方式对夏玉米氮素吸收、分配及去向的影响。分析目标产量下化肥氮的变化,解析夏玉米花前、花后氮素利用及转移规律,探讨肥料氮、土壤氮与作物氮之间的关系,为该地区夏玉米的科学合理施氮提供合理依据。【方法】在传统和优化两种管理方式定位试验中设置¹⁵N 微区,采用将¹⁵N 标记的尿素表施的方法,分析植株和土壤样品。新鲜土壤用 1 mol/L KCl 浸提,滤液用 TRACCS 2000 型流动分析仪测定土壤的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量。¹⁵N 标记的土壤和植物全氮的测定用烘干样(过 0.15 mm 筛),然后用美国 THERMO finnigan 公司生产的稳定同位素质谱仪 Delta Plus XP 进行测定。【结果】在该试验条件下,优化方式下夏玉米籽粒产量和总吸氮量显著高于传统方式,分别增加 12% 和 10%。作物收获后,优化方式的¹⁵N 吸收量及利用率显著高于传统方式,利用率分别为 20.81%、32.54%。夏玉米各器官中氮素的积累量和向籽粒中的转移量土壤氮显著高于肥料氮,传统方式籽粒中氮素的 57.73%、优化方式籽粒中氮素的 45.15% 来自各器官的转移,近一半的氮素是在花后积累的,基施高氮对作物生长作用不大。开花期土壤表层硝态氮含量传统方式显著高于优化方式,收获后有所降低,而土壤深层含量明显增加,有向下淋洗的趋势。夏玉米收获后,传统方式各土层的原子百分超均高于优化方式,而且在 20—40 cm 处出现了明显的¹⁵N 累积峰,与开花期相比,40 cm 以下土层的原子百分超明显增大,氮肥随水向下淋洗强烈。夏玉米收获后传统方式土壤氮素残留率高达 56.18%,表现为土壤残留 > 损失 > 作物吸收;优化方式则表现为土壤残留 > 作物吸收 > 损失。【结论】在优化方式中夏玉米施氮量为 N 185 kg/hm² 时,玉米达到高产水平且氮肥的利用率高。适当减少施氮量及增加后期追肥次数可实现夏玉米的高产和肥料的高效利用。

关键词: ¹⁵N; 夏玉米; 管理方式; 花前花后; 氮去向

中图分类号: S513.062.01; S153.6⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2015)01-0036-10

Effects of different management patterns on uptake, distribution and fate of nitrogen in summer maize

XU Ming-jie¹, ZHANG Lin¹, WANG Xin-ying¹, PENG Ya-jing¹, ZHANG Li-juan^{1,2*}, JU Xiao-tang³

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China;

2 Key Laboratory for Farmland Eco-Environment of Hebei Province, Baoding, Hebei 071000, China;

3 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: 【Objectives】 A field experiment was conducted to determine effects of different management patterns on uptake, distribution and fate of nitrogen in summer maize. We indicated impacts of optimizing management pattern on “N uptake-soil residues-loss”, explored nitrogen accumulation and transport at the anthesis and maturity stages, and identified fate of nitrogen. The study can provide theoretical and technical supports for local agricultural development. 【Methods】 Two management patterns [i. e., conventional pattern (CT) and optimized pattern (YH) in nitrogen and water management] were designed through establishing ¹⁵N-micropolt experiments in the field. We analyzed characteristics and nitrogen utilization by measuring the soil and plant samples. Soil samples were extracted with 1 mol/L KCl, and analyzed for NH₄⁺-N and NO₃⁻-N using continuous flow analysis (TRAACS

收稿日期: 2013-12-30 接受日期: 2014-06-13

基金项目: “十二五”国家粮食丰产科技工程(2011BAD16B08, 2012BAD04B06, 2013BAD07B05)项目资助。

作者简介: 徐明杰(1985—), 女, 河北迁安人, 硕士研究生, 主要从事土壤环境质量方面的研究。E-mail: xumingjie2010@163.com

* 通信作者 Tel: 0312-7528210, E-mail: lj_zh2001@163.com

2000) in laboratory. The samples were dried and sieved through a 0.15 mm mesh. They were taken for determination of ^{15}N using the Delta plus XP. **【Results】** The differences of grain yield and total nitrogen uptake between the optimized and conventional patterns are significant. As to the conventional pattern, the grain yield and nitrogen uptake are 12% and 10% lower than those of the optimized patterns, respectively. The rate of ^{15}N utilization of the conventional patterns (20.81%) is significantly lower than that of the optimized patterns (32.54%). The contents of accumulated nitrogen in the crop aboveground organs and the contents of transferred nitrogen to the grain of soil nitrogen are significantly higher than those of fertilizer nitrogen. About half of nitrogen content in seed comes from the accumulation after the flowering. The transport contribution rates by organs of the conventional and optimized patterns are 57.73% and 45.15%, respectively. The nitrate and marked ^{15}N accumulation amounts in the soil surface at the period of the anthesis under the conventional patterns are higher than those under the optimized patterns, and after the harvest the ^{15}N content of the conventional pattern with soil depth is increased for the first and then decreased, with the accumulation peak in 20–40 cm. The residual nitrogen rate in soil of the conventional pattern is up to 56.18%. The fate of nitrogen fertilizer is as follows: soil residual > loss > crop uptake. As to the optimized treatment, the fate of nitrogen fertilizer is as follows: soil residual > crop uptake > loss. **【Conclusions】** It can be reached high level of grain yield and efficiency of nitrogen with nitrogen controlled at around 185 kg/ha. Thus, less nitrogen and more times of fertilization at late growth stage not only raise the efficiency of nitrogen fertilizer but also increase food production.

Key words: ^{15}N ; summer maize; management pattern; anthesis; fate of nitrogen

玉米在我国粮食生产上占有重要地位,戴景瑞等^[1]认为,2008~2020年我国玉米单产年均递增188.7 kg/hm²才能保证未来玉米的消费需求。巨晓棠等^[2]认为,即使在肥力较高的土壤上氮肥的施用对于冬小麦和夏玉米的高产稳产也是必不可少的,但夏玉米生长期正处于北方高温多雨季节,降水量大而且比较集中,如果追肥不合理,很容易造成氮素淋失^[3],带来一系列的环境问题^[4]。目前华北平原地区冬小麦-夏玉米轮作体系中氮肥过量施用已相当严重^[5],在山东地区,夏玉米季农民的传统施氮量为 N 259 kg/hm²,高于推荐施氮量的 57%^[6]。这种过量施肥不仅不会达到作物高产的目的,还会降低氮肥的利用率^[7]。玉米对氮素的吸收、同化与转运直接影响其生长和发育,从而影响产量^[8]。Wang 等^[9]认为,较高的籽粒产量来自于较高的氮素利用效率和氮素再分配效率。

关于夏玉米生长期间的氮素吸收利用及损失也有不少报道^[10-14]。易镇邪等^[15]、赵营等^[16]就不同氮肥类型和供氮水平对夏玉米氮素吸收、积累、转运的影响进行了研究。范亚宁等^[17]认为,夏玉米生长期适宜的施氮量为 N 135 kg/hm²,该施氮水平可以保证经济效益和环境保护的双赢。过量或不合理施肥造成氮肥的当季利用率降低,收获后残留在土壤中的大量氮主要以 NO₃⁻-N 的形式存在^[18-19],随灌水或降雨向下迁移,当淋溶到 2 m 以下时,极易对地

下水造成污染^[20-21]。吴永成等^[22]的研究表明,施用氮肥可显著提高玉米的籽粒产量,但随施氮量的增加产量变化不大。

尽管目前已有不少围绕玉米季的氮肥利用特征及去向的研究,但是关于高产体系下作物花前花后氮素利用及转移规律的研究相对较少。因此,本研究以曲周为代表的华北平原为对象,布置 ^{15}N 微区,利用 ^{15}N 标记技术进行试验,分析目标产量下化肥氮的变化,解析夏玉米花前花后氮素利用及转移规律,探讨肥料氮、土壤氮与作物氮之间的关系,为该地区夏玉米的科学合理施氮提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验在河北省邯郸市中国农业大学曲周实验基地进行。2007年10月,布设“华北平原可持续高产作物生产体系及资源优化利用”长期定位试验,在主试验开展4年的基础上,于2011年6月至2011年10月进行本试验。该基地位于河北省南部太行山东麓海河平原的黑龙港流域,曲周县地处东经114°50′~115°13′,北纬36°34′~36°57′之间,平均海拔39.6 m,地下水埋深10—20 m,属温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温13.4℃,全年无霜期平均201d,年平均降水量494 mm,主要集中在6~8月,年际间变化大。2011年6月~2011年10月

夏玉米试验期间降水量为 367.00 mm, 比 2006 ~ 2010 年该期间平均降水量高 87.98 mm, 属较湿润年份。

供试土壤为山前平原冲积性潮褐土, 各土层土壤的基本理化性质见如表 1, 该试验地属中肥力土壤^[23]。

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 The major chemical characteristics of the experimental soil

土层 Soil depth (cm)	全碳 Total C (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	速效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)	pH	颗粒组成 Particle (%)			容重 Density (g/cm ³)
								砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	
0—30	16.30	0.70	3.10	14.60	34.40	72.70	7.72	39.34	58.25	2.41	1.37
30—60	15.10	0.40	2.20	5.90	21.20	35.60	7.85	24.81	72.57	2.62	1.35
60—90	14.60	0.20	1.30	2.60	17.10	26.00	7.84	64.26	33.97	1.77	1.44

1.2 田间试验设计

1.2.1 试验设计与布置 长期定位试验设置 2 种管理方式: 1) 传统方式, 为秸秆不还田, 传统氮肥管理 (CT); 2) 优化方式, 为秸秆还田和推荐施肥 (YH)。每处理重复 4 次, 主试验大区面积 30 × 60 m, 处理间间隔 2 m, 区组间间隔 5 m。

1.2.2 ¹⁵N 微区田间设置及施肥方法 在主试验大区内设置 ¹⁵N 微区。微区用长 1 m, 宽 1 m, 高 0.4 m 的铁皮框制成。整好地后, 划出微区所在位置, 将铁皮框放到微区所在的位置, 外围垂直挖出 0.35 m, 将铁皮框套入土中, 使其周围与土壤紧贴, 铁皮框上方露出地表 5 cm。每季作物设置 2 个微区, 一个用于开花期破坏性取样, 一个用于收获期取样。微区施用的氮肥为 5.22% 丰度的 ¹⁵N 标记尿素, 播种前在微区内取出 1 kg 左右的土, 过 5 mm 筛, 再与做基肥的 ¹⁵N 标记的尿素和磷、钾肥混匀, 均匀撒施到微

区, 翻耕后播种; 追肥采用与大田相同的施肥方式。

1.2.3 种植方式和田间管理 两处理供试夏玉米品种为郑单 958, 密度为 75000 plant/hm², 于 2011 年 6 月 17 日播种。播后两处理各灌水 70 mm, 作物生长期雨水充沛, 不再进行补充灌溉。传统方式氮肥施用量是通过各区域农户调查来确定, 代表了该地区内农民的平均习惯施肥量, 为 N 250 kg/hm²。优化方式是根据作物关键生育期追肥前根层土壤无机氮 (硝态氮 + 铵态氮) 含量和氮素供应目标值之间的差异来确定施氮量; 夏玉米季的施肥量定为 N 185 kg/hm², 关键追肥期为播种期、6 叶期和 13 叶期 (表 2)。两处理磷肥施用量均为 P₂O₅ 45 kg/hm², 随播种机器施入; 传统方式夏玉米钾肥施用量为 K₂O 45 kg/hm², 优化方式为 K₂O 90 kg/hm², 其中 45 kg/hm² 在播种时施入, 45 kg/hm² 在夏玉米 6 叶期追施。

表 2 夏玉米不同氮肥管理方式
Table 2 Chemical N fertilizer input for summer maize under different management patterns

处理 Treatment	施氮量 N rate (kg/hm ²)			合计 Total
	基肥 Base fertilizer	六叶期 Six leaf stage	十三叶期 Thirteen leaf stage	
传统方式 CT	100	0	150	250
优化方式 YH	45	80	60	185

注 (Note): CT—Conventional pattern; YH—Optimized pattern.

1.3 采样与测定

播种前采集试验地 0—100 cm (以 20 cm 为间隔) 土壤样品, 测定土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量。

1.3.1 植物样品 在作物花期和成熟期, 将 ¹⁵N 微区的植株地上部全部收获。所有植株沿地面全部割下称鲜重, 风干后称重, 之后在 65℃ 下烘干, 称干重。

将用于测定的植株样品全部粉碎过 0.15 mm 筛,混合后,连续用 4 分法取测定所需的样品量,用于测定植株含氮量和¹⁵N 丰度。

1.3.2 土壤样品 在采集植物样品的同时在微区采集 0—100 cm 的土壤(以 20 cm 为间隔,每区取两钻,等层混合),测定各层次中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的含量以及¹⁵N(全氮)丰度。

1.4 测定方法

1.4.1 土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的测定 将采集的新鲜土样过 5 mm 筛后,称取 24.00g 于 200 mL 的塑料瓶中,加入 100 mL 浓度为 1 mol/L 的 KCl 浸提,振荡,过滤,滤液用 TRACCS 2000 型连续流动分析仪测定。

1.4.2 土壤及植物全氮和¹⁵N 丰度的测定 烘干样品过 0.15 mm 筛,然后用 Delta Plus XP¹⁵N 仪器测定(美国 THERMO finnigan 公司生产)¹⁵N 丰度。

1.4.3 土壤水分含量的测定 采用烘干法测定土壤含水量。

1.5 计算公式与数据分析

土壤各层全氮来自标记¹⁵N 的 % Ndff = $\frac{\text{土壤各层全氮的}^{15}\text{N 原子百分超}}{\text{标记的}^{15}\text{N 原子百分超}} \times 100$

土壤各层来自¹⁵N 肥料的氮量 Ndff(kg/hm²) = 土壤各层全氮含量(kg/hm²) × 土壤各层 % Ndff

植物的 % Ndff = $\frac{\text{植株中的}^{15}\text{N 原子百分超}}{\text{肥料的}^{15}\text{N 原子百分超}} \times 100$

植株氮素来自化肥氮的量 Ndff(kg/hm²) = 植物 % Ndff × 植物吸氮量(kg/hm²)

化肥氮损失量(kg/hm²) = 标记氮肥施用量 - 植株吸收 Ndff - 土壤残留 Ndff

化肥氮残留率(%) = $\frac{\text{标记化肥氮残留量}}{\text{标记氮肥施用量}} \times 100$

化肥氮损失率(%) = $\frac{\text{标记化肥氮损失量}}{\text{标记氮肥施用量}} \times 100$

各器官氮素转移量(kg/hm²) = 开花期各器官氮素吸收量 - 收获期各器官吸收量

各器官氮素贡献率(%) = $\frac{\text{各器官氮素转移量}}{\text{籽粒氮吸收量}} \times 100$

试验数据采用 Excel 2003 和 SAS 8.0 中的单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 地上部生物量及吸氮量

两处理虽施肥量和追肥时期不同,但开花期夏玉米地上部生物量没有显著差异(表 3)。开花后,玉米干物质大量积累,优化方式的籽粒产量显著高于传统方式,达到 9685 kg/hm²,比传统方式增产 12%。与生物量相同,两种管理方式的开花期吸氮量没有显著差异,优化方式夏玉米总吸氮量略低于传统方式。收获时作物秸秆吸氮量显著降低,大量的氮素转移到籽粒中,优化管理方式籽粒吸氮量(126.6 kg/hm²)显著高于传统方式(115.2 kg/hm²),优化方式总吸氮量比传统方式增加 10%。在夏玉米干物质累积时期,优化方式的氮肥分两次追施,促进了作物对氮素的吸收。

表 3 夏玉米生物量及吸氮量(kg/hm²)

Table 3 Aboveground biomass and N uptake of maize in micro-plots

生育期 Growth stage	处理 Treatment	生物量 Biomass yield			吸氮量 N uptake		
		秸秆 Straw	籽粒 Grain	合计 Total	秸秆 Straw	籽粒 Grain	合计 Total
开花期 Anthesis	CT	7300 a		7300 a	150.8 a		150.8 a
	YH	7317 a		7317 a	147.2 a		147.2 a
成熟期 Maturity	CT	7882 a	8641 b	16523 b	70.0 a	115.2 b	185.2 b
	YH	8679 a	9685 a	18364 a	77.1 a	126.6 a	204.1 a

注(Note): CT—传统方式 Conventional pattern; YH—优化方式 Optimized pattern. 同列数据后不同字母表示同一生育期处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments in same growth stage at the 5% level.

2.2 夏玉米氮肥利用率

开花期不同管理方式夏玉米地上部¹⁵N 吸收量未表现出显著差异(表4)。开花期优化方式氮肥利用率为 21.76%,传统方式为 16.42%,优化方式显著高于传统。花前传统方式虽施高氮,但作物氮肥利用率却显著低于优化方式,这与优化方式在夏玉米大量吸收氮素的阶段及时追施氮肥以满足作物生

长有关。

收获时夏玉米秸秆的¹⁵N 吸收量和¹⁵N 利用率较开花期明显降低,前期吸收的大量氮素转移到籽粒中。除秸秆¹⁵N 吸收量两处理差异不显著外,优化方式地上部¹⁵N 吸收量和¹⁵N 利用率均显著高于传统方式。可见基于土壤测试的基、追肥分配促进了作物对氮肥的吸收利用。

表4 夏玉米对标记¹⁵N 肥料的吸收

Table 4 Recovery of ¹⁵N-labeled fertilizer by summer maize

生育期 Growth stage	处理 Treatment	¹⁵ N 吸收量 Uptake of ¹⁵ N (kg/hm ²)			¹⁵ N 利用率 Recovery of ¹⁵ N (%)		
		秸秆 Straw	籽粒 Grain	合计 Total	秸秆 Straw	籽粒 Grain	合计 Total
开花期 Anthesis	CT	41.03 a		41.03 a	16.42 b		16.42 b
	YH	40.26 a		40.26 a	21.76 a		21.76 a
成熟期 Maturity	CT	19.63 a	32.40 b	52.03 b	7.85 b	12.96 b	20.81 b
	YH	23.08 a	37.13 a	60.21 a	12.47 a	20.07 a	32.54 a

注(Note): CT—传统方式 Conventional pattern; YH—优化方式 Optimized pattern. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

2.3 土壤氮和肥料氮的吸收与分配

开花期和成熟期,两处理夏玉米各营养器官土壤氮的积累量及比例均显著高于肥料氮(表5)。开花期两处理对于肥料氮和土壤氮的吸收比例约为

3:7,土壤氮占整个植株吸氮量的 70% 左右,处理间差异不明显,说明土壤氮是作物营养生长阶段的主要氮源。

表5 开花期、收获期不同来源氮素在夏玉米各器官中的积累与分配

Table 5 Accumulation and distribution of nitrogen in different organs of summer maize from different sources at the anthesis and maturity stages

生育期 Growth stage	氮素来源 N source	处理 Treat.	氮素积累量 (kg/hm ²) Nitrogen accumulation amount					分配比例 (%) Distribution proportion				
			叶片 Leaf	茎+叶鞘 SS	苞叶+穗轴 BC	籽粒 Grain	合计 Total	叶片 Leaf	茎+叶鞘 SS	苞叶+穗轴 BC	籽粒 Grain	合计 Total
开花期 Anthesis	肥料氮 NDF	CT	21.19 a	17.43 a	2.41 a		41.03 a	15.71 a	12.92 a	1.79 a		30.41 a
		YH	18.61 a	18.53 a	3.12 a		40.26 a	13.90 a	13.84 a	2.33 a		30.07 a
	土壤氮 NDFS	CT	45.26 a	42.44 a	6.18 a		93.88 a	33.55 a	31.46 a	4.58 a		69.59 a
		YH	44.10 a	42.70 a	6.82 a		93.62 a	32.94 a	31.89 a	4.69 a		69.93 a
成熟期 Maturity	肥料氮 NDF	CT	11.97 a	5.78 b	1.87 a	29.90 b	49.53 b	6.55 a	3.16 a	1.02 a	16.36 a	27.09 a
		YH	12.51 a	8.36 a	2.21 a	37.13 a	60.21 a	6.14 a	4.10 b	1.08 b	18.22 a	29.54 a
	土壤氮 NDFS	CT	30.78 a	14.08 a	5.55 a	82.81 a	133.22 a	16.84 a	7.71 a	3.04 a	45.32 a	72.91 a
		YH	32.89 a	15.68 a	5.49 a	89.49 a	143.56 a	16.14 a	7.70 a	2.69 a	43.92 a	70.46 a

注(Note): NDF—N derived from fertilizer; NDFS—N derived from the soil; BC—Corn bract + Cob; SS—Stem + Sheath. CT—传统方式 Conventional pattern; YH—优化方式 Optimized pattern. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

与开花期相比,收获期两处理夏玉米对于土壤氮和肥料氮的吸收总量明显增加,但仍表现为土壤氮积累量显著高于肥料氮;两处理各营养器官土壤氮积累量较开花期大幅减少,大量土壤氮转移到籽粒中;优化方式对土壤氮的吸收略高于传统方式,但差异不明显。对肥料氮的吸收比例,收获时传统方式较花前略有减少,优化方式的花前花后吸收比例基本一致。收获期优化方式茎+叶鞘和苞叶+穗轴对肥料氮的吸收比例均显著高于传统方式,土壤氮的分配比例处理间差异不明显;从整个植株对肥料氮和土壤氮的吸收比例来看,土壤氮所占的比例显著高于肥料氮,这说明土壤氮也是作物生殖生长阶段的主要氮源。

从表 6 可以看出,夏玉米各器官对于肥料氮和土壤氮的转移量均表现为茎+叶鞘>叶片>苞叶+穗轴($P<0.05$),土壤氮的转移量显著高于肥料氮。除叶片的肥料氮转移量传统方式高于优化方式外,其他无明显差异。各器官氮素贡献率与氮素转移量趋势一致,土壤氮显著高于肥料氮。肥料氮转移贡献率传统方式显著高于优化方式;土壤氮的转移贡献率传统方式略高于优化方式,但差异不明显。传统和优化两种方式的转移氮贡献率分别为 57.73% 和 45.15%,说明两处理籽粒中的氮素分别有 43.27% 和 54.85% 是花后吸收的,玉米籽粒的氮素约有一半是在花后积累的,基施高氮对作物产量形成的作用不大。

表 6 开花后营养器官中氮素向籽粒的转移量及贡献率

Table 6 Nitrogen translocation amount and contribution proportion from vegetative organs to grain after the anthesis

氮素来源 N source	处理 Treatment	氮素转移量 N translation (kg/hm ²)				转移氮贡献率 Contribution ratio of N for grain (%)			
		叶片 Leaf	茎+叶鞘 SS	苞叶+穗轴 BC	合计 Total	叶片 Leaf	茎+叶鞘 SS	苞叶+穗轴 BC	合计 Total
肥料氮	CT	9.22 a	11.65 a	0.54 a	21.41 a	8.31 a	10.41 a	0.44 a	19.16 a
NDFE	YH	6.10 b	10.17 a	0.91 a	17.18 a	4.85 b	8.17 a	0.72 a	13.74 b
土壤氮	CT	14.48 a	28.35 a	0.97 a	43.80 a	12.83 a	24.97 a	0.77 a	38.57 a
NDFS	YH	11.21 a	26.99 a	1.32 a	39.52 a	8.80 a	21.58 a	1.03 a	31.41 a

注(Note): NDFE—N derived from fertilizer; NDFS—N derived from the soil. CT—传统方式 Conventional pattern; YH—优化方式 Optimized pattern; BC—Corn bract + Cob; SS—Stem + Sheath. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

2.4 土壤剖面硝态氮运移与¹⁵N 丰度的变化

开花期土壤硝态氮含量自上而下逐渐减少,传统方式在 9.44 ~ 85.06 mg/kg 之间波动,优化方式波动范围较小,为 14.66 ~ 27.97 mg/kg(图 1)。收获期优化方式土壤硝态氮含量变化不大,传统方式表现为先降低后升高的趋势;表层土壤硝态氮含量两处理均在 50 mg/kg 左右,深层硝态氮含量传统方式显著高于优化。开花期两处理¹⁵N 含量均表现为自上而下逐渐减小的趋势,氮肥累积在土壤表层。收获后传统方式各层原子百分超均高于优化方式。与开花期相比,优化方式在 20—40 cm 处的¹⁵N 含量有所提高,但随土层深度的增加而降低;传统方式原子百分超在 20—40 cm 处出现了明显的累积峰,40 cm 以下原子百分超明显增大,可见在农民传统施肥中,夏玉米季结束时氮肥在土壤剖面有累积并开始随水向下运移。

2.5 夏玉米季化肥氮的总去向

夏玉米收获后传统方式氮去向表现为土壤残留>损失>作物吸收(表 7),传统方式的氮肥残留量高达 140.46 kg/hm²,损失量为 57.51 kg/hm²;优化方式的氮肥总去向表现为土壤残留>作物吸收>损失,优化方式的土壤残留和损失量显著低于传统方式,分别为 85.96 kg/hm² 和 38.83 kg/hm²;优化方式作物吸收量为 60.21 kg/hm²,显著高于传统方式。大量氮肥残留在土壤中成为土壤氮库的一部分,其余氮肥因夏玉米季气温高、雨水多,以气态形式挥发或随水运移到根区外造成损失。

3 讨论

本试验选择以曲周为代表的华北平原为研究对象,利用¹⁵N 标记技术,研究不同氮肥与秸秆管理下夏玉米花前花后的氮素利用、转运规律的差异及高产体系化肥氮、土壤氮与作物氮之间的变化,以期

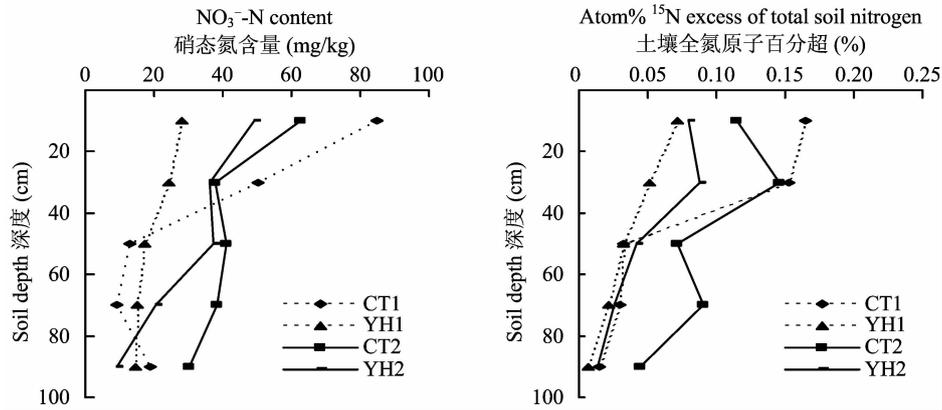


图1 不同生育期土壤硝态氮和¹⁵N的动态变化

Fig. 1 The movement of nitrate and labeled ¹⁵N in soil profile during different growth periods

[注(Notes): CT1—传统方式开花期 Conventional pattern at the anthesis; YH1—优化方式开花期 Optimized pattern at the anthesis; CT2—传统方式收获期 Conventional pattern at the maturity; YH2—优化方式收获期 Optimized pattern at the maturity.]

表7 标记氮肥的去向

Table 7 The fate of ¹⁵N-labeled fertilizer after summer maize harvest

处理 Treatment	施氮量 N rate (kg/hm ²)	作物吸收 Crop uptake		0—100 cm 土壤残留 Soil reside		损失 Loss	
		(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)	(%)
CT	250	52.03 b	20.81b	140.46 a	56.18 a	57.51 a	23.00 a
YH	185	60.21 a	32.54 a	85.96 b	46.47 a	38.83 b	20.98 a

注(Notes): CT—传统方式 Conventional pattern; YH—优化方式 Optimized pattern. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

为夏玉米高产、氮素高效利用提供理论依据。赵士诚等^[24]的研究表明,与农民习惯施氮肥 N 240 kg/hm²相比,氮肥减量30%后玉米的产量和植株吸氮量均没有降低,氮肥利用率却显著增加,说明在华北高肥力地区,在保证夏玉米高产的同时,在农民习惯施肥的基础上减少施肥量是可行的,同时可提高肥料利用率。本试验结果表明,施氮量为 N 185 kg/hm²时的夏玉米已达到高产水平 9685 kg/hm²。籽粒产量和吸氮量均显著高于传统管理方式,籽粒产量比传统管理方式增产12%。在考虑土壤自身供氮水平的基础上,适当降低肥料的施用量不仅不会影响夏玉米的产量,而且可将氮素的表观损失降到一个较低的水平^[25]。

李志勇等^[3]认为,较低和合理的施肥量可极大地提高优化施肥的氮肥利用率,较传统施肥提高11.80%。杨治平等^[26]的研究表明,秸秆与氮肥配施能使氮肥利用率提高3.9%~13.9%。本试验夏玉米对标记¹⁵N的吸收和利用结果表明,收获后优化方式的¹⁵N吸收量和利用率均显著高于传统方

式,高于传统方式 8.18 kg/hm² 和 11.73%,秸秆还田与优化氮肥管理促进了作物对氮素的吸收利用。应用基于土壤硝态氮测试的氮素实时管理提高了玉米氮素的吸收效率和利用效率^[27]。

玉米籽粒中的氮一方面来源于抽雄前的茎秆、叶片中积累氮素的再转移^[28],另一方面直接源于根系的氮素吸收^[29-30]。开花至成熟期是玉米氮素吸收运转分配的重要时期^[31]。玉米植株吸收的氮素主要来源于土壤氮和肥料氮,本试验两种管理方式开花后营养器官中积累土壤氮的转移量显著高于肥料氮,表明土壤氮是籽粒蛋白质积累的主要氮素来源。传统和优化方式的氮素转移量分别为 65.21 和 56.70 kg/hm²,花前氮素转运量随施氮量的增加有升高趋势^[31]。传统方式籽粒中的氮素 43.27%、优化方式中的 54.85%来自于开花后的吸收,这与赵营等^[16]研究玉米在不同氮水平下,各器官的氮转移量在 37.2%~57.3%的结果相一致。由此表明,玉米籽粒的一半氮素是花后积累的,这是因为夏玉米干物质及养分随生育期延长而持续增加,其变化趋

势可用“S”曲线方程进行拟合^[32],花后干物质及养分的积累量大。

周顺利等^[33]认为,施氮肥提高了土壤硝态氮含量,而且提高程度与用量成正比。吴永成等^[34]在河北吴桥的研究表明,在玉米收获期,施氮处理(N 90~270 kg/hm²)2 m 土体均有明显的硝态氮残留积累,并且残留积累量随着施氮量的增加而增大。本试验中,开花期传统方式0—20 cm 土层的硝态氮含量显著高于优化方式,收获后40—60 cm 土层的硝态氮含量明显增加,出现了向下淋洗的现象。这表明大量施入氮肥,增加了土壤硝态氮含量,由于玉米季雨水充分,大量硝态氮随水分向下运移。

吴永成等^[22]的研究表明,各土层中的¹⁵N 残留量随施氮量的增多而增加,总体表现为随土壤层次加深而明显下降,本试验条件下优化方式土壤剖面残留¹⁵N 表现出类似的空间分布趋势。开花期传统方式20—40 cm¹⁵N 原子百分超显著高于优化方式,可见花前大量氮肥还积累于土壤表层。收获时传统方式各土层的残留¹⁵N 量高于优化方式。与开花期相比传统方式土壤表层原子百分超减小,40 cm 以下原子百分超明显增大,这表明氮肥已经进一步随水向下运移。

氮肥施入土壤后有3个去向,一是被当季作物吸收利用,二是以各种形式残留于土壤中,三是通过氨挥发、反硝化和硝酸盐淋洗等途径损失^[35]。这三个去向之间有密切的联系,施肥量越高利用率越低,而损失量越高^[36]。本试验中,传统方式土壤残留量和损失量显著高于优化方式,但作物吸收量显著低于优化方式。夏玉米收获后传统方式氮去向表现为土壤残留>损失>作物吸收;优化方式氮肥总去向表现为土壤残留>作物吸收>损失。氮肥利用率随施氮量的升高而降低^[35],当季作物收获后,尚有46.47%~56.18%的氮肥残留在0—100 cm 的土壤中,成为土壤氮库的补充。

综上所述,合理调控氮素投入量及时期,在合理的栽培管理条件下施氮量控制在N 185 kg/hm²。减少前期施肥量,增加后期施氮次数及比例,满足玉米花后吸收氮素的需求,可以实现氮素高效利用前提下的作物高产。

参 考 文 献:

[1] 戴景瑞,鄂立柱. 我国玉米育种科技创新问题的几点思考[J]. 玉米科学, 2010, 18(1): 1-5.
Dai J R, E L Z. Scientific and technological innovation of maize

breeding in China[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(1): 1-5.
[2] 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 Agricultura Sinica, 2002, 35(11): 1361-1368.
[3] 李志勇,王璞,魏亚萍,Boening-Zilkens M. 不同施肥条件下夏玉米的干物质累积、产量及氮肥利用效率[J]. 华北农学报, 2003, 18(4): 91-94.
Li Z Y, Wang P, Wei Y P, Boening-Zilkens M. Effects of different nitrogen fertilization managements on dry matter accumulation, yield and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2003, 18(4): 91-94.
[4] Zhang W L, Tian Z X, Zhan N *et al.* Nitrate pollution of groundwater in northern China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1996(59): 223-231.
[5] 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.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924.
[6] Huang J K, Xiang C, Jia X, Hu R. Impacts of training on farmers' nitrogen use in maize production in Shandong, China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 67(4): 321-327.
[7] 刘新宇. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系化肥氮后效及去向定量研究[D]. 河北保定: 河北农业大学硕士学位论文, 2010.
Liu X Y. Nitrogen fertilizer residual effect and its fate in winter wheat-summer maize rotations in North China Plain[D]. Baoding, Hebei: Hebei Agricultural University, 2010.
[8] 夏来坤,陶洪斌,王璞,等. 施氮期对夏玉米氮素积累运移及氮肥利用的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(1): 112-116.
Xia L K, Tao H B, Wang P *et al.* Effects of nitrogen application period on nitrogen accumulation, translocation and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(1): 112-116.
[9] Wang H, McCaig T N, DePauw R M *et al.* Physiological characteristics of recent Canada western red spring wheat cultivars: components of grain nitrogen yield[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2003, 83(4): 699-707.
[10] 张丽娟,巨晓棠,高强,张福锁. 玉米对土壤深层标记硝态氮的利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 455-461.
Zhang L J, Ju X T, Gao Q, Zhang F S. Recovery of ¹⁵N-labeled nitrate injected into deep subsoil by maize in a Calcaric Cambisol in North China Plain[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(5): 455-461.
[11] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China-contribution

- to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63: 117-127.
- [12] 易镇邪, 王璞, 刘明, 等. 不同类型氮肥与施氮量下夏玉米水、氮利用及土壤氮素表观盈亏[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 63-67.
Yi Z X, Wang P, Liu M *et al.* Water and nitrogen utilization and apparent budget of soil nitrogen under different types of nitrogen fertilizer and application rates in summer maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1): 63-67.
- [13] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥的损失途径分析[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(12): 1493-1499.
Ju X T, Liu X J, Zou G Y *et al.* Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(12): 1493-1499.
- [14] 苏芳, 丁新泉, 高志岭, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系氮肥的氨挥发[J]. *中国环境科学*, 2007, 37(3): 409-413.
Su F, Ding X Q, Gao Z L *et al.* Ammonia volatilization from nitrogen fertilization of winter wheat-summer maize rotation system in the North China Plain [J]. *China Environmental Science*, 2007, 37(3): 409-413.
- [15] 易镇邪, 王璞, 申丽霞, 等. 不同类型氮肥对夏玉米氮素累积、转运与氮肥利用的影响[J]. *作物学报*, 2006, 32(5): 772-778.
Yi Z X, Wang P, Shen L X *et al.* Effects of different types of nitrogen fertilizer on nitrogen accumulation, translocation and nitrogen fertilizer utilization in summer maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(5): 772-778.
- [16] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(5): 622-627.
Zhao Y, Tong Y A, Zhao H B. Effects of different N rates on nutrients accumulation, translocation and yield of summer maize [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(5): 622-627.
- [17] 范亚宁, 李世清, 李生秀. 半湿润地区农田夏玉米氮肥利用率及土壤硝态氮动态变化[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(4): 799-806.
Fan Y N, Li S Q, Li S X. Utilization rate of fertilizer N and dynamic changes of soil NO_3^- -N in summer maize field in semi-humid area of Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(4): 799-806.
- [18] Ju X T, Liu X J, Zhang F S, Roelcke M. Nitrogen fertilization, soil nitrate accumulation, and policy recommendations in several agricultural regions of China[J]. *Ambio*, 2004, 33(6): 300-305.
- [19] 张丽娟, 巨晓棠, 张福锁, 等. 土壤剖面不同层次标记硝态氮的运移及其后效[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1964-1972.
Zhang L J, Ju X T, Zhang F S *et al.* Movement and residual effect of labeled nitrate-N in different soil layers [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1964-1972.
- [20] 张玉铭, 张佳宝, 胡春胜, 等. 华北太行山前平原农田土壤水分动态与氮素的淋溶损失[J]. *土壤学报*, 2006, 43(1): 17-25.
Zhang Y M, Zhang J B, Hu C S *et al.* Nitrate leaching in wheat-maize rotation field in the north China plain [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 17-25.
- [21] 李东坡, 武志杰. 化学肥料的土壤生态环境效应[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1158-1165.
Li D P, Wu Z J. Impact of chemical fertilizers application on soil ecological environment [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 1158-1165.
- [22] 吴永成, 王志敏, 周顺利. ^{15}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.
Wu Y C, Wang Z M, Zhou S L. Studies on the characteristics of nitrogen fertilizer utilization in summer maize based on techniques of soil column and ^{15}N -label [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(12): 2446-2453.
- [23] 徐艳, 运向杰, 郭力娜, 张凤荣. 挖损农田复垦前后地力变化研究—以华北平原的曲周为例[J]. *土壤通报*, 2010, 41(1): 108-111.
Xu Y, Yun X J, Guo L N, Zhang F R. The fertility changes of the cultivated land damaged by digging before and after its reclamation—A case study in Qu Zhou county, North China Plain [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(1): 108-111.
- [24] 赵士诚, 裴雪霞, 何萍, 等. 氮肥减量后移对土壤氮素供应和夏玉米氮素吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 492-497.
Zhao S C, Pei X X, He P *et al.* Effects of reducing and postponing nitrogen application on soil N supply, plant N uptake and utilization of summer maize [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 492-497.
- [25] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同施氮量对夏玉米产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. *土壤肥料*, 2006, 15(2): 30-33.
Zhao Y, Tong Y A, Zhao H B. Effects of different N rates on yield of summer maize, fertilizer N recovery and N balance [J]. *Soils and Fertilizers*, 2006, 15(2): 30-33.
- [26] 杨治平, 周怀平, 李红梅. 旱农区秸秆还田秋施肥对春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(6): 49-52.
Yang Z P, Zhou H P, Li H M. Effect of autumn fertilization combined with returning stalks to field on corn yield and water use efficiency in arid farming areas [J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001, 17(6): 49-52.
- [27] 叶优良, 黄玉芳, 刘春生, 等. 氮素实时管理对夏玉米产量和氮素利用的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(1): 152-157.
Ye Y L, Huang Y F, Liu C S *et al.* Effect of in-season nitrogen management strategy on maize grain yield and nitrogen use efficiency [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(1): 152

- 157.
- [28] Crawford T W J, Rending V V, Broadbent F E. Sources, fluxes, and sinks of nitrogen during early reproductive growth of maize [J]. *Journal of Plant Physiology*, 1982, 70: 1654-1660.
- [29] Osaki M, Morikawa K, Shimano T *et al.* Productivity of high-yielding crop. II Comparison of N, P, K, Ca and Mg accumulation and distribution among high yielding crops [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1991, 37: 445-454.
- [30] Osaki M, Shimano T, Tadano T. Redistribution of carbon and nitrogen compounds from the shoot to the harvesting organs during maturation in filed crops [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1991, 37: 117-128.
- [31] 吕鹏, 张吉旺, 刘伟, 等. 施氮量对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 852-860.
Lü P, Zhang J W, Liu W *et al.* Effects of nitrogen application on yield and nitrogen use efficiency of summer maize under super-high yield conditions [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 852-860.
- [32] 宋海星, 李生秀. 不同水、氮供应条件下夏玉米养分积累动态研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(4): 399-403.
Song H X, Li S X. Dynamics of nutrient accumulation in maize plants under different water and nitrogen supply conditions [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(4): 399-403.
- [33] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏研究 II. 夏玉米 [J]. *生态学报*, 2002, 22(2): 48-53.
Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. The spatio-temporal variation of soil NO_3^- -N and apparent budget of soil nitrogen II. Summer maize [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(2): 48-53.
- [34] 吴永成, 周顺利, 王志敏, 罗延庆. 华北地区夏玉米土壤硝态氮的时空动态与残留 [J]. *生态学报*, 2005, 25(7): 1620-1625.
Wu Y C, Zhou S L, Wang Z M, Luo Y Q. Dynamics and residue of soil nitrate in summer maize field of North China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1620-1625.
- [35] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考 [J]. *生态学报*, 2003, 12(2): 192-197.
Ju X T, Zhang F S. Thinking about nitrogen recovery rate [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 12(2): 192-197.
- [36] 左红娟, 白由路, 卢艳丽, 等. 基于高丰度 ^{15}N 华北平原冬小麦肥料氮的去向研究 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45(15): 3093-3099.
Zuo H J, Bai Y L, Lu Y L *et al.* Fate of fertilizer nitrogen applied to winter wheat in North China Plain based on high abundance of ^{15}N [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(15): 3093-3099.