

# 不同氮肥基追比对玉米氮素吸收利用、土壤氮素供应及产量的影响

刘昕萌<sup>1</sup>, 陈庚<sup>1</sup>, 王志国<sup>1</sup>, 贺韵涵<sup>1</sup>, 李威<sup>2</sup>, 吴玥<sup>1</sup>, 杨德光<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学 农学院, 黑龙江 哈尔滨 150000; 2. 东北农业大学 资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

**摘要:** 为了提高玉米全生育期氮素利用率和玉米产量, 为黑龙江地区玉米高产氮肥运筹模式提供参考, 以玉米品种先玉335和天农9为试材, 研究了相同施氮量下不同氮肥基追比(CK: 空白对照; T1: 50% 基肥 + 50% 开花肥; T2: 30% 基肥 + 40% 拔节肥 + 30% 开花肥; T3: 20% 基肥 + 60% 拔节肥 + 20% 开花肥; T4: 10% 基肥 + 60% 拔节肥 + 30% 开花肥)对玉米土壤无机氮含量变化、氮素平衡、不同生育时期氮素积累、氮素利用效率和玉米产量影响。结果表明, 与对照组相比, T2、T3、T4有效提高了灌浆期-成熟期土壤耕层无机氮含量; 对于氮素平衡, T2、T3、T4较T1处理显著降低了氮素表观损失量, 其中T4氮素表观损失量最低。与T1相比, 氮肥基追比T2、T3、T4显著提高了玉米开花期-成熟期氮积累量, 其中灌浆期-成熟期氮积累量以T4处理最高; 与T1相比, T2、T3、T4显著提高了玉米氮素吸收利用率、农学利用率和偏生产力, 提高幅度依次为16.66%~22.47%, 17.80%~35.76%, 4.93%~9.90%(先玉335)和6.55%~24.46%, 8.23%~36.94%, 2.02%~5.44%(天农9)。氮肥基追比T2、T3、T4的产量显著高于传统施氮处理T1, 其中T3的产量最高, 较T1相比分别提高9.90%(先玉335)和8.86%(天农9)。综上所述, 在本试验条件下, 总施氮量210 kg/hm<sup>2</sup>时, 20%基肥+60%拔节肥+20%开花肥为最佳氮肥基追比。

**关键词:** 玉米; 氮肥基追比; 产量; 氮素利用率

中图分类号: S143.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2020)05-0124-08

doi: 10.7668/hbxb.20190714



## Effects of Different Nitrogen Fertilizers on Nitrogen Uptake and Utilization, Soil Nitrogen Supply and Yield of Maize

LIU Xinmeng<sup>1</sup>, CHEN Geng<sup>1</sup>, WANG Zhiguo<sup>1</sup>, HE Yunhan<sup>1</sup>, LI Wei<sup>2</sup>, WU Yue<sup>1</sup>, YANG Deguang<sup>1</sup>

(1. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150000, China;

2. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150000, China)

**Abstract:** In order to improve the nitrogen use efficiency and corn yield during the whole growth period of maize, it provides a reference for the high-yield nitrogen fertilizer operation model of maize in Heilongjiang Area. Ratio (CK: blank control; T1: 50% base fertilizer + 50% flowering fertilizer; T2: 30% base fertilizer + 40% jointing fertilizer + 30% flowering fertilizer; T3: 20% base fertilizer + 60% jointing fertilizer + 20% flowering fertilizer; T4: 10% basal fertilizer + 60% jointing fertilizer + 30% flowering fertilizer) on the change of soil inorganic nitrogen content, nitrogen balance, nitrogen accumulation at different growth stages, nitrogen use efficiency and corn yield. The results showed that compared with the control group, T2, T3, and T4 effectively increased the inorganic nitrogen content of the soil plow layer during the filling stage and the mature stage; in terms of nitrogen balance, T2, T3, and T4 were significant difference than the T1 treatment. Reduced the apparent nitrogen loss, of which T4 apparent nitrogen loss was the lowest; compared with T1, reducing the ratio of nitrogen to topdressing significantly increased the nitrogen accumulation during the flowering-maturity period, and the nitrogen accumulation during the filling-maturity period T4 was the highest treatment; compared with T1, T2, T3, and T4 significantly increased the nitrogen absorption and utilization rate, agronomic utilization rate and partial productivity of maize, and

收稿日期: 2020-07-17

基金项目: 国家重点研究计划(2018YFD0300103); 农业部种子管理局“绿色品种鉴定评价专项”(111721301354052342); 东北农业大学“青年才俊”项目(17QC36)

作者简介: 刘昕萌(1995-), 男, 黑龙江牡丹江人, 硕士, 主要从事玉米栽培生理研究。

通讯作者: 杨德光(1967-), 男, 湖北孝感人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事玉米栽培生理研究。

the increase ranges was 16.66% - 22.47%, 17.80% - 35.76%, 4.93% - 9.90% (Xianyu 335) and 6.55% - 24.46%, 8.23% - 36.94%, 2.02% - 5.44% (Tiannong 9); reducing the ratio of nitrogen fertilizer to topdressing (T2, T3, T4) yields significantly higher than the traditional nitrogen application treatment T1, T3 had the highest yield, which was 9.90% (Xianyu 335) and 8.86% (Tiannong 9) compared with T1. In summary, under the experimental conditions, when the total nitrogen application rate was 210 kg/ha, 20% basal fertilizer + 60% jointing fertilizer + 20% flowering fertilizer was the best nitrogen basal dressing ratio.

**Key words:** Maize; Nitrogen fertilizer ratio; Yield; Nitrogen efficiency

玉米是国内种植面积最大,产量最高的重要粮食作物<sup>[1]</sup>。氮肥施用对玉米生长发育和产量形成都有非常显著的影响,但同时速效氮肥尿素等会受到挥发及淋失的影响限制了其利用效率<sup>[2]</sup>。据调查显示,传统玉米栽培模式多采用以基肥为主的施氮方式,并未根据玉米的氮素需求规律科学追肥<sup>[3-5]</sup>。氮肥施用不合理会造成土壤无机氮的淋失,导致资源浪费和环境污染特别是地下水污染,对生态环境产生严重破坏<sup>[6-7]</sup>。目前大量研究表明,提高玉米生育后期的氮肥施用量可以显著影响玉米开花期-灌浆期的土壤耕层无机氮含量及玉米地上部氮素积累<sup>[8]</sup>。李强等<sup>[9]</sup>研究表明,在 225 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥施用量下,氮肥运筹显著提高了玉米花后干物质积累量,由此显著提高了玉米产量及产量构成。吴永成等<sup>[10]</sup>研究表明,在相同施氮量下氮肥运筹处理较 100% 基肥处理相比显著提高了玉米生育后期土壤氮素含量并有效降低了土壤氮素表观损失。曹玉军等<sup>[11]</sup>认为,玉米生育后期氮素吸收积累量占全生育期总积累量的一半左右,所以通过氮肥后移增强玉米生育后期氮素供应对玉米高产稳产至关重要。张吉旺等<sup>[12]</sup>研究发现,于玉米拔节期后施氮 2~3 次可以显著提高玉米的营养价值和品质。前人研究多侧重于不同氮肥施用时期及比例对玉米产量、氮素吸收、土壤氮素积累等指标的影响及氮肥运筹对玉米光合作用的影响,而对氮肥运筹与玉米产量及产量构成、土壤氮素积累、玉米氮素积累及吸收利用率的关系还有待进一步研究<sup>[13]</sup>。本研究以玉米品种先玉 335 和天农 9 为材料,探究了在施氮量相同条件下不同氮肥基追比对玉米不同生育时期产量和干物质积累的影响、植株氮素积累特征、土壤剖面无机氮含量变化、土壤-作物氮素平衡的关系,以便为东北地区玉米栽培提供更加合理的氮肥后移方案。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验于东北农业大学农学院阿城实验基地进

行,土壤基本理化性质:pH 值 6.768,全氮含量 1.47 mg/kg,有机质含量 29.8 mg/kg,有效磷 29.1 mg/kg,速效钾 122.5 mg/kg。

### 1.2 试验材料

供试玉米品种为先玉 335 和天农 9,供试肥料为重过磷酸钙 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:46%) 80 kg/hm<sup>2</sup>、尿素 (N:46%) 210 kg/hm<sup>2</sup>、硫酸钾 (K<sub>2</sub>O:50%) 48 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.3 试验设计

播种时间为 2018 年 4 月 28 日,小区采用随机区组排列,每小区长 8 m、宽 5.2 m,小区面积约 41 m<sup>2</sup>,每个处理 3 次重复。玉米植株行距 66 cm、株距 25 cm,栽培密度为 60 600 株/hm<sup>2</sup>。磷钾肥一次施用。氮肥施用方法:CK,空白对照;T1,50% 基肥 + 50% 开花肥;T2,30% 基肥 + 40% 拔节肥 + 30% 开花肥;T3,20% 基肥 + 60% 拔节肥 + 20% 开花肥;T4,10% 基肥 + 60% 拔节肥 + 30% 开花肥。

### 1.4 样品采集及指标测定

于玉米苗期-成熟期采集不同氮肥运筹处理玉米植株样品,每个小区取植株 5 株,于 105 °C 杀青 30 min 后,70 °C 烘干至恒质量并粉碎,称质量计算不同处理植株生物量。植株样本粉碎后采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法进行消煮,凯氏定氮法测定植株氮含量;于玉米苗期采集 0~40 cm 土壤样品,拔节期-成熟期采集 0~100 cm 土壤样品,每 20 cm 分别取样,用 KCl 溶液浸提振荡 1.5 h 后过滤,采用分光光度计法分别测定土壤中硝态氮和铵态氮含量,最后加和为土壤无机氮含量。于玉米成熟期选用小区第 3,4 行进行测产并计算收获指数。并选取有代表性的 30 个果穗测定产量及产量构成因素。

### 1.5 数据处理与分析

收获指数 (%) = 籽粒产量/总生物量 × 100% ;

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

氮素农学利用率 (kg/kg) = (施氮区作物产量 - 不施氮区玉米产量)/施氮量;

氮素偏生产力 (kg/kg) = 施氮区作物产量/施氮量;

土壤无机氮含量 (mg/kg) = 硝态氮含量 + 铵态氮含量;

土壤氮素净矿化量 (kg/hm<sup>2</sup>) = 不施氮肥区作物地上部分氮积累量 + 不施氮肥区土壤残留无机氮量 - 不施氮肥区起始无机氮量;

氮素表观损失量 (kg/hm<sup>2</sup>) = 施氮量 + 土壤起始无机氮积累量 + 土壤氮素净矿化量 - 作物氮携出量 - 土壤无机氮残留量<sup>[2]</sup>。

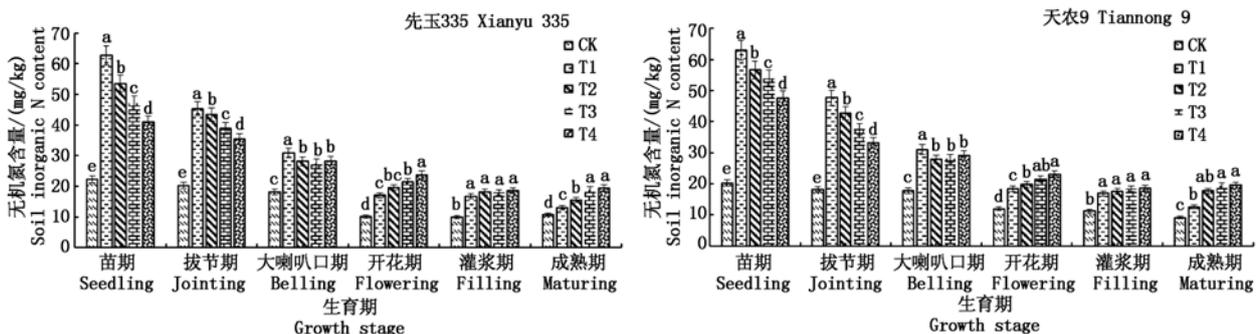
试验数据采用 IBM SPSS Statistics 22 进行单因素方差分析和相关分析, 用 Sigma Plot 14.0 制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同氮肥基追比对玉米各生育期土壤无机氮含量的变化

由图 1 可知, 不同氮肥基追比对不同玉米品种 0~20 cm 土壤无机氮含量有显著影响。先玉 335 和天农 9 的土壤无机氮含量均随着生育期的推进基本上呈降低的趋势。与传统施氮模式 T1 相比, 不同氮肥基追玉米除灌浆期外的其他生育期土壤无机

氮含量有显著影响 ( $P < 0.05$ )。对于苗期 - 大喇叭口期, 土壤无机氮含量表现为 T1 最高。在苗期, 不同玉米品种 T1 处理土壤无机氮含量较 T2、T3、T4 显著提高了 17.07% ~ 53.57% (先玉 335) 和 11.19% ~ 32.64% (天农 9); 在拔节期, 不同玉米品种 T1 处理土壤无机氮含量较 T2、T3、T4 显著提高了 4.23% ~ 28.26% (先玉 335) 和 11.74% ~ 43.90% (天农 9); 在大喇叭口期, 不同玉米品种 T1 处理土壤无机氮含量较 T2、T3、T4 显著提高了 9.15% ~ 12.31% (先玉 335) 和 5.59% ~ 11.31% (天农 9)。对于开花期 - 成熟期, T4 的土壤无机氮含量最高。在开花期, 不同玉米品种 T4 处理土壤无机氮含量较 T1、T2、T3 分别提高了 10.59% ~ 39.36% (先玉 335) 和 7.18% ~ 24.81% (天农 9); 在灌浆期, 不同玉米品种 T4 处理土壤无机氮含量较 T1、T2、T3 分别提高了 2.32% ~ 10.82% (先玉 335) 和 0.97% ~ 9.81% (天农 9); 在成熟期, 不同玉米品种 T4 处理土壤无机氮含量较 T1、T2、T3 分别提高了 3.24% ~ 50.03% (先玉 335) 和 1.16% ~ 55.10% (天农 9)。



相同生育期内的不同小写字母表示不同处理间在  $P < 0.05$  水平差异显著。图 2 同。

Different lowercase letters in the same growth period indicate significant differences between different treatments at  $P < 0.05$  level. The same as Fig. 2.

图 1 不同氮肥基追比对玉米各生育期土壤 0~20 cm 无机氮含量的变化

Fig. 1 Variation of 0~20 cm soil inorganic nitrogen content in different growth stages of maize under different nitrogen fertilizers

### 2.2 不同氮肥基追比对不同品种玉米氮素平衡的影响

由表 1 可知, 在相同氮肥施用量下, 降低氮肥基追比对先玉 335 和天农 9 品种的玉米氮素平衡影响显著 ( $P < 0.05$ )。与传统施氮模式 T1 相比, T2、T3、T4 的作物携出和土壤残留无机氮分别提高了 21.58% ~ 32.43%, 5.8% ~ 13.61% (先玉 335) 和 23.8% ~ 43.97%, 5.88% ~ 12.73% (天农 9); 对于氮素表观损失量, T1 较 T2、T3、T4 分别增加了 41.10% ~ 91.18% (先玉 335) 和 42.41% ~ 129.41% (天农 9)。

### 2.3 不同氮肥基追比对玉米氮素吸收及氮素利用效率的影响

由表 2 可知, 不同氮肥基追比对先玉 335 和天

农 9 拔节期后的氮积累量及氮素利用效率有显著影响 ( $P < 0.05$ )。与传统施氮模式 T1 相比, 降低氮肥基追比显著增加了玉米花后氮积累量 ( $P < 0.05$ )。不同氮肥基追比间苗期氮积累量差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 对于拔节期和大喇叭口期, T1 的氮积累量最高, 较 T2、T3、T4、T5 提高 9.5% ~ 20.08% 和 8.21% ~ 13.83% (先玉 335)、13.10% ~ 23.73% 和 6.4% ~ 12.21% (天农 9)。对于开花期、灌浆期和成熟期, T4 的氮积累量最高, 较 T1、T2、T3 提高 2.88% ~ 6.20%, 2.50% ~ 17.28% 和 6.58% ~ 39.91% (先玉 335) 以及 2.12% ~ 6.10%, 5.34% ~ 20.2%, 2.52% ~ 26.85% (天农 9)。此外, 不同氮肥基追比显著影响了玉米的氮素吸收利用率、氮素农学利用效率和氮素偏生产力 ( $P < 0.05$ )。较传统施氮模式

T1 相比, T2、T3、T4 的氮素吸收利用率、氮素农学利用率和氮素偏生产力依次提高了 16.66% ~ 22.47%, 17.80% ~ 35.76%, 4.93% ~ 9.90% (先玉 335) 和

6.55% ~ 24.46%, 8.23% ~ 36.94%, 2.02% ~ 5.44% (天农 9), 其中, T4 的氮素吸收利用率最高, T3 的氮素农学利用率和氮素偏生产力最高。

表 1 不同氮肥基追比对不同品种玉米氮素平衡的影响

Tab. 1 Effects of different nitrogen fertilizers on nitrogen balance of different varieties of maize kg/hm<sup>2</sup>

品种 Species	处理 Treatment	氮素输入 Nitrogen input			氮素输出 Nitrogen output		
		施氮量 N fertilizer	起始无机氮 Initial inorganic N	净矿化 Mineralization	作物携出 Crop uptake	残留无机氮 Residual inorganic N	氮素表观损失 Apparent N loss
先玉 335 Xianyu 335	CK	210.00	116.50	70.25	121.48 ± 2.43e	64.06 ± 1.28e	-
	T1	210.00	116.50	70.25	153.09 ± 1.06d	108.57 ± 2.17d	135.09 ± 2.70a
	T2	210.00	116.50	70.25	186.14 ± 2.72c	114.87 ± 1.29c	95.74 ± 1.91b
	T3	210.00	116.50	70.25	198.31 ± 2.28b	120.28 ± 1.40ab	78.16 ± 1.79c
	T4	210.00	116.50	70.25	202.74 ± 2.05a	123.35 ± 2.46a	70.66 ± 1.41d
天农 9 Tiannong 9	CK	210.00	110.32	68.81	113.31 ± 2.94e	53.71 ± 2.07d	-
	T1	210.00	110.32	68.81	147.35 ± 2.26d	103.54 ± 1.04c	138.24 ± 2.76a
	T2	210.00	110.32	68.81	182.42 ± 1.64c	109.63 ± 2.19b	97.07 ± 1.51b
	T3	210.00	110.32	68.81	209.16 ± 3.18b	114.78 ± 1.19a	65.19 ± 1.25c
	T4	210.00	110.32	68.81	212.14 ± 2.24a	116.73 ± 2.34a	60.26 ± 1.31d

注: 同列数据后不同字母表示在 5% 水平上差异显著。表 2-3 同。

Note: Different letters after the same column data indicate significant difference at 5% level. The same as Tab. 2-3.

表 2 不同氮肥基追比对玉米氮素吸收及氮素利用效率的影响

Tab. 2 Effects of different nitrogen fertilizers on nitrogen uptake and nitrogen use efficiency in maize

品种 Species	处理 Treatment	氮积累量/(kg/hm <sup>2</sup> ) N accumulation						氮素吸收 利用率/% Nitrogen absorption utilization efficiency	氮素农学利 用率/(kg/kg) Nitrogen agronomic efficiency	氮素偏生 产力/(kg/kg) Nitrogen partial factor productivity
		苗期 Seedling	拔节期 Jointing	大喇叭口期 Belling	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	成熟期 Maturing			
先玉 335 Xianyu 335	CK	3.01 ± 0.25a	28.97 ± 0.45e	73.10 ± 3.65d	98.05 ± 2.15d	114.99 ± 2.29d	119.71 ± 2.39d	25.32 ± 0.50d	12.80 ± 0.14d	52.77 ± 0.88d
	T1	3.12 ± 0.16a	57.14 ± 0.87a	114.88 ± 3.74a	140.12 ± 1.43c	149.01 ± 2.98c	161.16 ± 2.22c	35.06 ± 0.77c	13.85 ± 0.25c	53.82 ± 0.92c
	T2	3.26 ± 0.16a	46.10 ± 2.33b	105.97 ± 1.29b	142.65 ± 1.28bc	165.45 ± 1.30b	189.71 ± 2.79b	37.39 ± 0.74b	17.53 ± 0.30a	57.49 ± 1.22a
	T3	3.32 ± 0.16a	44.70 ± 1.17c	103.67 ± 1.18bc	145.58 ± 2.69ab	170.02 ± 2.40b	199.40 ± 1.98a	42.02 ± 0.84a	15.67 ± 0.33b	55.64 ± 1.06ab
	T4	3.28 ± 0.16a	42.14 ± 1.24d	104.38 ± 2.22c	148.67 ± 1.88a	179.11 ± 3.58a	204.44 ± 3.08a	42.02 ± 0.84a	15.67 ± 0.33b	55.64 ± 1.06ab
天农 9 Tiannong 9	CK	3.32 ± 0.33a	30.34 ± 1.10d	75.88 ± 1.61a	103.52 ± 1.19c	110.73 ± 2.98d	126.25 ± 2.52e	23.78 ± 0.68d	13.58 ± 0.28d	53.25 ± 0.98c
	T1	3.33 ± 0.26a	52.69 ± 1.43a	115.03 ± 2.12a	138.62 ± 1.59b	160.07 ± 2.21c	176.54 ± 3.03d	33.95 ± 0.48c	15.99 ± 0.31c	55.87 ± 1.02b
	T2	3.60 ± 0.35a	48.12 ± 1.26b	106.30 ± 2.36b	141.68 ± 1.63b	169.05 ± 1.38b	188.10 ± 3.76c	37.57 ± 0.71b	17.31 ± 0.38a	58.52 ± 0.85a
	T3	3.49 ± 0.19a	45.41 ± 1.19c	105.94 ± 2.11b	143.25 ± 0.99ab	170.57 ± 1.41ab	198.92 ± 4.01b	40.49 ± 0.41a	16.95 ± 0.21b	56.91 ± 1.38ab
	T4	3.61 ± 0.21a	43.88 ± 0.53c	101.05 ± 1.16c	147.38 ± 2.13a	174.84 ± 3.49a	212.02 ± 4.24a	40.49 ± 0.41a	16.95 ± 0.21b	56.91 ± 1.38ab

#### 2.4 不同氮肥基追比对玉米收获后 0 ~ 100 cm 土壤剖面无机氮的影响

由图 2 可知, 0 ~ 20 cm 土壤的无机氮含量最高, 随着土壤深度的增加土壤无机氮含量随之降低。与 CK 相比, 不同氮肥基追比处理显著提高了 0 ~ 100 cm 土壤无机氮含量 ( $P < 0.05$ ), 其中 T2、T3、T4 较 T1 存在显著差异, 但 T2、T3 和 T4 之间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。在相同氮肥施用量下, 不同氮肥基追比后 T2、T3、T4 的 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土壤无机氮含量较 T1 显著提高 16.95% ~ 24.41% 和 27.22% ~ 32.83% (先玉 335)、20.56% ~ 24.62% 和 21.18% ~ 32.21% (天农 9) ( $P < 0.05$ ); 而在 40 ~ 60 cm, 60 ~ 80 cm, 80 ~ 100 cm 土壤无机氮含量以 T1 最高, 较 T2、T3、T4 处理分别提高 21.83% ~ 31.72%, 31.08% ~ 49.58%, 45.78% ~ 52.92% (先玉

335) 和 15.03% ~ 31.24%, 32.08% ~ 49.81%, 38.59 ~ 53.08% (天农 9)。在土壤深度 40 ~ 100 cm, 降低氮肥基追比处理中 T1 的无机氮含量最高, 且 T2、T3、T4 处理间无机氮含量无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

#### 2.5 不同氮肥基追比对不同品种玉米产量及产量构成因素的影响

由表 3 可知, 与空白对照 (CK) 相比, 不同品种各氮肥基追比处理产量分别提高了 38.28% ~ 51.97% (先玉 335) 和 32.02% ~ 45.04% (天农 9), 增产显著, 其中, T3 产量最高, 较 T1 分别增产 9.90% (先玉 335) 和 8.86% (天农 9), 其后依次为 T4 和 T2。此外, 氮肥后移对玉米穗行数的影响不显著 ( $P > 0.05$ ) 但对行粒数、百粒质量和收获指数影响显著。与空白对照 (CK) 相比, 不同氮肥处理行粒数分别提高了 0.55% ~ 10.11% (先玉 335) 和 1.12% ~ 10.64%

(天农 9); 百粒质量分别提高了 2.79% ~ 9.24% (先玉 335) 和 2.08% ~ 9.90% (天农 9); 收获指数

分别提高了 3 ~ 9 百分点(先玉 335) 和 1 ~ 10 百分点(天农 9)。

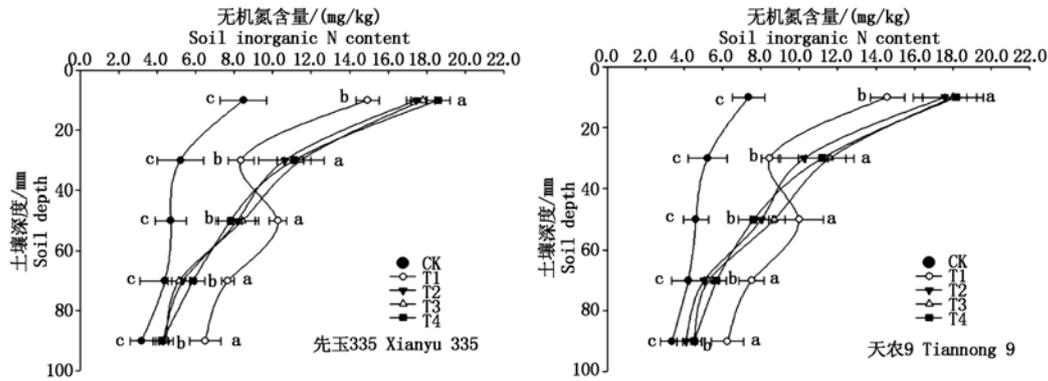


图 2 不同氮肥基追比对玉米收获后 0 ~ 100 cm 土壤剖面无机氮的影响

Fig. 2 Effect of different nitrogen fertilizer base ratio on inorganic nitrogen in 0 - 100 cm soil profile after corn harvest

表 3 不同氮肥基追比对不同品种玉米产量及产量构成因素的影响

Tab. 3 Effects of different nitrogen fertilizers on yield and yield components of different varieties of maize

品种 Species	处理 Treatment	产量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Yield	穗行数 Number of rows	行粒数 Number of grains	百粒质量/g 100-grain weight	收获指数/% Harvest index
先玉 335 Xianyu 335	CK	8 086.42 ± 161.72d	17.27 ± 0.12a	36.60 ± 1.25d	45.48 ± 0.63d	48.52 ± 0.96c
	T1	11 181.89 ± 223.63c	17.43 ± 0.28a	37.53 ± 0.93c	46.74 ± 0.41cd	50.11 ± 0.84bc
	T2	11 732.74 ± 234.65b	17.62 ± 0.25a	36.80 ± 1.04d	47.54 ± 0.25bc	51.27 ± 1.02ab
	T3	12 288.92 ± 145.78a	17.68 ± 0.19a	39.20 ± 0.82b	49.04 ± 0.49ab	53.16 ± 0.41a
天农 9 Tiannong 9	CK	8 392.99 ± 201.61e	17.21 ± 0.26a	35.70 ± 0.52d	45.63 ± 0.61c	49.16 ± 0.94c
	T1	11 080.77 ± 167.85d	17.45 ± 0.14a	36.10 ± 0.37d	46.58 ± 0.24b	50.63 ± 0.26bc
	T2	11 301.99 ± 226.04c	17.49 ± 0.18a	37.50 ± 1.03c	47.28 ± 0.76b	51.89 ± 0.36ab
	T3	12 073.70 ± 143.47a	17.63 ± 0.16a	39.50 ± 1.33a	49.56 ± 0.33a	53.22 ± 0.36a
	T4	11 683.71 ± 133.67b	17.42 ± 0.13a	38.60 ± 1.26b	50.14 ± 0.25a	52.31 ± 0.28ab

## 2.6 玉米不同生育时期氮素积累对产量及产量构成因素的影响

相关分析(表 4)表明,对于先玉 335 和天农 9,

不同氮肥基追比下玉米产量及产量构成因素与玉米不同生育期氮素积累量间均表现为正相关,开花期 - 成熟期的氮积累量与产量及产量构成因素呈显

表 4 玉米不同生育时期氮素积累对产量及产量构成因素的影响

Tab. 4 Effect of nitrogen accumulation on yield and yield components in different growth stages of maize

品种 Species	项目 Item	玉米氮素积累 Nitrogen accumulation in maize					
		苗期 Seedling	拔节期 Jointing	大喇叭口期 Belling	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	成熟期 Maturing
先玉 335 Xianyu 335	产量	0.695 *	0.807 **	0.851 **	0.986 **	0.978 **	0.882 **
	穗行数	0.891 **	0.490	0.546 *	0.885 **	0.960 **	0.999 **
	行粒数	0.516 *	0.213	0.297	0.636 *	0.657 *	0.777 **
	百粒质量	0.784 **	0.404	0.479	0.833 **	0.894 **	0.968 **
	收获指数	0.761 **	0.471	0.550 *	0.853 **	0.922 **	0.962 **
	氮素吸收利用率	0.752 **	-0.998 **	-0.945 **	0.938 **	0.967 **	0.963 **
	氮素农学利用率	0.638 *	-0.894 **	-0.781 **	0.736 **	0.825 **	0.772 **
天农 9 Tiannong 9	产量	0.612 *	-0.886 **	-0.772 **	0.702 **	0.748 **	0.736 **
	穗行数	0.616 *	0.786 **	0.867 **	0.984 **	0.952 *	0.948 **
	行粒数	0.855 **	0.632 *	0.751 **	0.841 **	0.789 **	0.815 **
	百粒质量	0.973 **	0.123	0.388	0.708 **	0.884 **	0.884 **
	收获指数	0.875 **	0.158	0.435	0.743 **	0.875 **	0.886 **
	氮素吸收利用率	0.989 **	0.380	0.620 *	0.865 **	0.931 **	0.960 **
	氮素农学利用率	0.824 **	-0.879 **	-0.839 **	0.982 *	0.935 **	0.918 **
	氮素偏生产力	0.867 **	-0.732 **	-0.811 **	0.748 **	0.803 **	0.783 **
	氮素偏生产力	0.848 **	-0.712 **	-0.804 **	0.729 **	0.794 **	0.764 **

注: \*, \*\* . 在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

Note: \* and \*\* . The difference was significant difference at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

著( $P < 0.05$ )或极显著( $P < 0.01$ )正相关;不同氮肥基追比下玉米的氮素吸收利用率、氮素农学利用率和氮素偏生产力在拔节期-大喇叭口期与氮素积累量呈显著( $P < 0.05$ )或极显著( $P < 0.01$ )负相关,而在其他生育期则与氮素积累量呈显著( $P < 0.05$ )或极显著( $P < 0.01$ )正相关。

### 3 讨论与结论

施用氮肥能显著提高土壤无机氮含量,而土壤无机氮是玉米等作物从土壤中吸收氮素的主要形式<sup>[13-15]</sup>。前人研究指出,优化施氮模式能显著提高作物全生育期土壤无机氮含量<sup>[16-18]</sup>。孙文涛等<sup>[19]</sup>研究指出,在相同条件下,提高氮肥施用量,虽然土壤无机氮含量明显提高,但土壤氮素盈余量及氮素淋洗量也会随之增加。赵士诚等<sup>[20]</sup>指出,基施氮肥比例过大会造成无机氮淋洗至深层土壤;而提高追肥比例并将氮肥后移施用可以提高作物生育后期土壤耕层氮素有效供给。本研究结果表明,在相同条件下,与传统施氮处理相比,降低氮肥基追比显著增加了不同品种玉米灌浆期-成熟期的0~20 cm土壤无机氮含量,同时降低了收获后40~100 cm深度的土壤无机氮含量;此外,氮肥基追比通过增加氮素作物携出并减少土壤残留无机氮来降低玉米的氮素表现损失。由此可知,氮肥后移可以显著提升玉米生育期后半段的土壤供氮能力,减少氮素损失,为提高玉米产量提供充足的氮素供给。

氮肥在玉米不同生育时期不同比例施用会导致氮素吸收的差异,从而影响玉米生长发育和产量。前人研究表明,玉米取得高产既需要保证花前营养器官吸收氮素建立高效的群体结构来保证花后物质生产,又需要满足花后籽粒灌浆和穗部发育的氮素需求<sup>[21-23]</sup>;而氮肥后移能显著增加玉米开花后氮素向籽粒运输的效率,从而提高玉米产量和氮素利用效率<sup>[24-26]</sup>。本研究结果表明,在玉米苗期-大喇叭口期,不同氮肥基追比间传统施氮模式T1的氮素积累量最高,但在对于玉米产量最为关键的开花期-灌浆期氮素积累量低于氮肥基追比T2、T3、T4。由此可知,相同施氮量下玉米生育前期施氮过多会导致生育后期氮素供给不足,加速玉米生育后期的衰老,以至玉米成熟期氮素积累量较低。同时不同氮肥基追比在不同生育时期的氮素积累量表现不同。对于玉米拔节期-大喇叭口期,T2的氮素积累量优于T3、T4,但对于玉米产量形成的关键生育时期灌浆期-成熟期,T4氮素积累量优于T2。因此,在保证玉米生育前期氮素需求的情况下将氮肥后

移,既能保证玉米营养生长期较高的氮素积累,又能满足玉米花后的氮素吸收能力,从而达到提高玉米灌浆期-成熟期的氮素积累氮肥和利用效率的目标。相关分析结果表明,玉米生育后期(开花期-成熟期)氮素积累与玉米产量及产量构成因素和氮素利用率及偏生产力呈显著或极显著相关,因此,在相同施氮量下提高氮肥后移比例从而增加玉米开花期-成熟期的氮素积累不仅可以提高玉米产量及产量构成因素,还对提高玉米氮素利用率及氮素偏生产力具有积极意义。

玉米在不同生育时期对氮素利用的效率具有明显差异。优化氮肥施用方法,不仅能满足玉米在各生育时期的生长发育需求,还能提高玉米对氮肥的利用效率,是提升玉米产量及品质最有效的方法之一。前人研究表明,施用氮肥可以显著增强玉米光合产物的制造、转运以及运输能力,提高百粒质量和行粒数,进而提高玉米产量<sup>[27-28]</sup>。在玉米的生育时期中,开花期-灌浆期是玉米氮素积累中最关键的时期,同时也是玉米穗粒数和百粒质量形成的关键时期,提高此时期的氮肥供应可以明显改善玉米氮素积累,加快玉米灌浆速率,促进玉米穗部生长发育,最终提高玉米的氮素利用效率。但同时玉米生育前期的氮肥施用同样对玉米生长发育起关键作用,所有氮肥后移均应在保证玉米前期生长发育和氮素积累的前提下进行。本研究结果表明,传统施氮模式T1由于玉米苗期氮肥施用比例过大,导致养分集中于玉米前期的营养生长,消耗了大量的光合产物用于蛋白质的合成,导致生殖生长期碳水化合物向玉米穗部的转运能力下降,使玉米的产量和氮素利用效率较低。氮肥基追比T4则由于后移比例过大基肥施用不足,阻碍了玉米前期营养生长阶段的生长发育,同时影响了玉米的光合产物积累和冠层发育,使玉米产量和氮素利用效率没有得到充分挖掘,而T3既满足了玉米营养生长阶段的养分供给,也补充了玉米生殖生长阶段的养分需求,最终获得较高的玉米产量和氮素农学利用率及氮素偏生产力。

相同氮肥施用量下,提高氮肥追肥比例显著提高了玉米生育后期氮素积累量和氮肥利用效率。同时,降低氮肥基追比可以显著提高玉米行粒数、百粒质量和玉米产量。对于玉米开花期-成熟期,降低氮肥基追比显著提高了土壤0~20 cm无机氮含量和玉米地上部氮素积累量,并在显著提高作物氮素携出量和土壤残留无机氮的情况下降低了氮素表现损失。在不同氮肥基追比中,20%基肥+60%拔节

肥 + 20% 开花肥对提高玉米产量和氮素利用率、降低氮素表观损失等方面效果最佳。综上所述,在施氮量为 210 kg/hm<sup>2</sup> 时,20% 基肥 + 60% 拔节肥 + 20% 开花肥为该地区最佳氮肥基追比。

参考文献:

- [1] 王洪预. 东北春玉米不同种植模式比较研究[D]. 长春:吉林大学,2019.  
Wang H Y. Comparative study on different planting patterns of spring maize in Northeast China[D]. Changchun:Jilin University, 2019.
- [2] 侯云鹏,尹彩侠,孔丽丽,秦裕波,李前,于雷,王立春,谢佳贵. 氮肥对吉林春玉米产量、农学效率和养分平衡的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(6): 93-98. doi:10.11838/sfsc.20160615.  
Hou Y P, Yin C X, Kong L L, Qin Y B, Li Q, Yu L, Wang L C, Xie J G. Effects of nitrogen fertilizer on yield, agronomic efficiency and nitrogen balance of spring maize in Jilin Province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(6): 93-98.
- [3] 张平良,郭天文,刘晓伟,李书田,曾骏,谭雪莲,董博. 密度和施氮量互作对全膜双垄沟播玉米产量、氮素和水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 579-590.  
Zhang P L, Guo T W, Liu X W, Li S T, Zeng J, Tan X L, Dong B. Effect of plant density and nitrogen application rate on yield, nitrogen and water use efficiencies of spring maize under whole plastic-film mulching and double-furrow sowing[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4): 579-590.
- [4] 侯云鹏,孔丽丽,李前,尹彩侠,秦裕波,于雷,王立春,谢佳贵. 滴灌施氮对春玉米氮素吸收、土壤无机氮含量及氮素平衡的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 238-245. doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2018.01.037.  
Hou Y P, Kong L L, Li Q, Yin C X, Qin Y B, Yu L, Wang L C, Xie J G. Effects of drip irrigation with nitrogen on nitrogen uptake, soil inorganic nitrogen content and nitrogen balance of spring maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 238-245.
- [5] 郭金金,张富仓,王海东,闫世程,郑静,陈东峰,李志军. 不同施氮量下缓释氮肥与尿素掺混对玉米生长与氮素吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(20):3930-3943. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2017.20.009.  
Guo J J, Zhang F C, Wang H D, Yan S C, Zheng J, Chen D F, Li Z J. Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on maize growth and nitrogen uptake under different nitrogen application rates[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(20):3930-3943.
- [6] 黄兴法,赵楠,任夏楠,杨建国,纪立东,李光永. 宁夏引黄灌区膜下滴灌春玉米适宜施肥量试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(12): 28-31. doi:10.13522/j.cnki.gggs.2015.12.007.  
Huang X F, Zhao N, Ren X N, Yang J G, Ji L D, Li G Y. Experimental research on fertilization requirement of spring maize under drip irrigation in Ningxia irrigation area[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(12): 28-31.
- [7] 武文明,陈洪俭,王世济,魏凤珍,李金才. 氮肥运筹对苗期受渍夏玉米干物质和氮素积累与转运的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(8): 1246-1256. doi:10.3724/SP.J.1006.2015.01246.  
Wu W M, Chen H J, Wang S J, Wei F Z, Li J C. Effects of nitrogen fertilization application regime on dry matter, nitrogen accumulation and transportation in summer maize under waterlogging at the seedling stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(8): 1246-1256.
- [8] 徐祥玉,张敏敏,翟丙年,李生秀. 施氮对不同基因型夏玉米干物质累积转移的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 786-792. doi:10.3321/j.issn:1008-505X.2009.04.008.  
Xu X Y, Zhang M M, Zhai B N, Li S X. Effects of nitrogen application on dry matter accumulation and translocation of different genotypes of summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(4): 786-792.
- [9] 李强,孔凡磊,袁继超. 氮肥运筹对不同氮效率玉米品种干物质生产及产量的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(6): 174-182. doi:10.7668/hbxb.2018.06.024.  
Li Q, Kong F L, Yuan J C. Effects of nitrogen fertilizer operation on dry matter production and yield of maize cultivars with contrasting nitrogen efficiency[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(6): 174-182.
- [10] 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. doi:10.3321/j.issn:1000-0933.2005.07.013.  
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.
- [11] 曹玉军,魏雯雯,徐国安,王晓慧,王洪君,刘春光,边少锋,刘慧涛,王永军. 半干旱区不同地膜覆盖滴灌对土壤水、温变化及玉米生长的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(1): 107-113. doi:10.3969/j.issn.1005-0906.2013.01.020.  
Cao Y J, Wei W W, Xu G A, Wang X H, Wang H G, Liu C G, Bian S F, Liu H T, Wang Y J. Effects of different films on soil water, temperature and corn growth characteristics under drip-irrigation conditions in semi-arid region[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(1): 107-113.
- [12] 张吉旺,王空军,胡昌浩,董树亭,刘鹏. 施氮时期对夏玉米饲用营养价值的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1337-1342. doi:10.3321/j.issn:0578-1752.2002.11.007.  
Zhang J W, Wang K J, Hu C H, Dong S T, Liu P. Effect of different nitrogen application stages on forage nutritive value of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(11): 1337-1342.
- [13] Rimsk-Korsakov H, Rubio G, Lavado R S. Fate of the nitrogen from fertilizer in field-grown maize[J]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2012, 93:253-263 doi:10.1007/s10705-012-9513-1.
- [14] 袁漫漫,邬刚,孙义祥,张祥明,王文军,曹哲伟. 缓释尿素对两种土壤小麦氮素运转、产量和土壤无机氮的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 233-239. doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2018.04.037.  
Yuan M M, Wu G, Sun Y X, Zhang X M, Wang W J, Cao Z W. Effects of slow-released urea on nitrogen translation and yield of wheat and soil inorganic nitrogen in two soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 233-239.

- [15] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 王朝辉, 张福锁. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1493-1499. doi:10.3321/j.issn:0578-1752.2002.12.011.
- Ju X T, Liu X J, Zou G Y, Wang C H, Zhang F S. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(12): 1493-1499.
- [16] 张忠学, 陈鹏, 聂堂哲, 姜浩, 孟翔燕, 杨军明. 不同水氮调控模式对稻田土壤氮素分布与有效性的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 210-219. doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.025.
- Zhang Z X, Chen P, Nie T Z, Jiang H, Meng X Y, Yang J M. Effects of different water and nitrogen regulation models on nitrogen distribution and availability in paddy soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11): 210-219.
- [17] 刘威, 周剑雄, 谢媛圆, 徐祥玉, 袁家富, 徐芳森, 熊汉锋, 熊又升. 控释尿素不同条施深度下鲜食玉米产量和氮素利用效应[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 246-251, 258. doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2018.01.038.
- Liu W, Zhou J X, Xie Y Y, Xu X Y, Yuan J F, Xu F S, Xiong H F, Xiong Y S. Yield and nitrogen utilization efficiency of fresh edible maize under different fertilization depths of control-release urea[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 246-251, 258.
- [18] 吴晓丽, 李朝苏, 汤永禄, 刘于斌, 李伯群, 樊高琼, 熊涛. 氮肥运筹对小麦产量、氮素利用效率和光能利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1889-1898. doi:10.13287/j.1001-9332.201706.008.
- Wu X L, Li C S, Tang Y L, Liu Y B, Li B Q, Fan G Q, Xiong T. Effect of nitrogen management modes on grain yield, nitrogen use efficiency and light use efficiency of wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6): 1889-1898.
- [19] 孙文涛, 孙占祥, 王聪翔, 宫亮, 张玉龙. 滴灌施肥条件下玉米水肥耦合效应的研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(3): 563-568. doi:10.3321/j.issn:0578-1752.2006.03.018.
- Sun W T, Sun Z X, Wang C X, Gong L, Zhang Y L. Coupling effect of water and fertilizer on corn yield under drip fertigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(3): 563-568.
- [20] 赵士诚, 裴雪霞, 何萍, 张秀芝, 李科江, 周卫, 梁国庆, 金继运. 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. doi:10.11674/zwyf.2010.0234.
- Zhao S C, Pei X X, He P, Zhang X Z, Li K J, Zhou W, Liang G Q, Jin J Y. Effects of reducing and postponing nitrogen application on soil N supply, plant N uptake and utilization of summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(2): 492-497.
- [21] 汤永禄, 李朝苏, 吴春, 吴晓丽, 黄钢, 何刚. 四川盆地单产 9000 kg/hm<sup>2</sup> 以上超高产小麦品种产量结构与干物质积累特点[J]. 作物学报, 2014, 40(1): 134-142. doi:10.3724/SP.J.1006.2014.00134.
- Tang Y L, Li C S, Wu C, Wu X L, Huang G, He G. Yield component and dry matter accumulation in wheat varieties with 9 000 kg/ha yield potential in Sichuan Basin[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(1): 134-142.
- [22] 安婷婷, 侯小畔, 周亚男, 刘卫玲, 王群, 李潮海, 张学林. 氮肥用量对小麦开花后根际土壤特性和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(17): 3352-3364. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2017.17.010.
- An T T, Hou X P, Zhou Y N, Liu W L, Wang Q, Li C H, Zhang X L. Effects of nitrogen fertilizer rates on rhizosphere soil characteristics and yield after anthesis of wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(17): 3352-3364.
- [23] 吴迪, 黄绍文, 金继运. 氮肥运筹、配施有机肥和坐水种对春玉米产量与养分吸收转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 317-326. doi:10.3321/j.issn:1008-505X.2009.02.011.
- Wu D, Huang S W, Jin J Y. Effects of nitrogen fertilizer management, organic manure application and bed-irrigation sowing on maize yield, and nutrient uptake and translocation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(2): 317-326.
- [24] Cui Z L, Chen X P, Miao Y X, Zhang F S, Sun Q P, Schroder J, Zhang H L, Li J L, Shi L W, Xu J F, Ye Y L, Liu C S, Yang Z P, Zhang Q, Huang S M, Bao D J. On-farm evaluation of the improved soil N<sub>min</sub>-based nitrogen management for summer maize in North China plain[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(3): 517-525. doi:10.2134/agronj2007.0194.
- [25] 马兴华, 梁晓芳, 刘光亮, 石屹, 张忠锋. 氮肥用量及其基追施比例对烤烟氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1655-1664. doi:10.11674/zwyf.15430.
- Ma X H, Liang X F, Liu G L, Shi Y, Zhang Z F. Effect of nitrogen application rate and base and topdressing ratio on nitrogen utilization of flue-cured tobacco[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6): 1655-1664.
- [26] 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 赵先丽, 张玉书. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2902-2909. doi:10.5846/stxb201306101632.
- Yu W Y, Ji R P, Feng R, Zhao X L, Zhang Y S. Response of water stress on photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize leaves in different growth stage[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(9): 2902-2909.
- [27] 王玉雯, 郭九信, 孔亚丽, 张瑞卿, 宋立新, 刘振刚, 张俊, 王建中, 郭世伟. 氮肥优化管理协同实现水稻高产和氮肥高效[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1157-1166. doi:10.11674/zwyf.15434.
- Wang Y W, Guo J X, Kong Y L, Zhang R Q, Song L X, Liu Z G, Zhang J, Wang J Z, Guo S W. Nitrogen optimize management achieves high grain yield and enhances nitrogen use efficiency of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(5): 1157-1166.
- [28] Chen Y L, Xiao C X, Wu D L, Xia T T, Chen Q W, Chen F J, Yuan L X, Mi G H. Effects of nitrogen application rate on grain yield and grain nitrogen concentration in two maize hybrids with contrasting nitrogen remobilization efficiency[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 62: 79-89. doi:10.1016/j.eja.2014.09.008.