

## 氮素调控对玉米氮素同化过程及产量的影响

戴馨<sup>1</sup>, 刘楠楠<sup>1</sup>, 夏炎<sup>1</sup>, 杨磊<sup>1</sup>, 郝芃钊<sup>2</sup>, 董召荣<sup>1</sup>, 车钊<sup>1\*</sup>

(1. 安徽农业大学农学院, 合肥 230036; 2. 吕梁市方山县农业农村局, 吕梁 033100)

**摘要:** 氮素调控措施与作物氮素吸收利用和产量密切相关, 但目前关于不同氮素调控措施对玉米主要生育期氮素同化过程的影响仍不清楚。以郑单 958 为试验材料, 设置不施氮肥 (CK)、传统施肥 (CN)、氮肥+生物炭 (SN) 和氮肥+硝化抑制剂 DMPP (DN) 4 个处理, 分析不同氮素调控对玉米氮素同化过程中铵态氮和硝态氮含量、硝酸还原酶 (NR) 和谷氨酰胺合成酶 (GS) 活性、游离氨基酸和可溶性蛋白含量以及氮素利用率和产量的影响。结果表明: DN 和 SN 处理较传统施肥处理均可以提高玉米植株体内硝态氮和铵态氮含量、NR 和 GS 活性; DN 和 SN 处理显著提高灌浆期谷氨酸、游离氨基酸和可溶性蛋白含量; DN 处理成熟期籽粒的氮素积累量显著高于 SN 和 CN 处理, 分别显著增加 18.4% 和 30.0%; DN 处理产量最高, SN 次之, 二者并无显著差异, 但相较 CN 处理分别显著增产 1 483.0 和 1 154.2 kg·hm<sup>-2</sup>。两种氮素调控均促进了玉米对氮素的吸收, 显著提高氮肥吸收利用率, 其中硝化抑制剂处理氮肥吸收利用率最高且显著高于其他处理。综上, 生物炭或硝化抑制剂配施氮肥, 可以促进玉米氮素同化和转运过程, 显著提高玉米产量和氮肥利用效率, 综合产量、籽粒氮素积累量和氮肥吸收利用率, 硝化抑制剂配施氮肥可作为淮河流域玉米高产高效的栽培措施。

**关键词:** 生物炭; 硝化抑制剂; 玉米; 产量; 氮素同化过程

中图分类号: S513; S311

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2022)04-0533-07

### Effects of nitrogen regulation on nitrogen assimilation process and yield of maize

DAI Xin<sup>1</sup>, LIU Nannan<sup>1</sup>, XIA Yan<sup>1</sup>, YANG Lei<sup>1</sup>, HAO Pengfang<sup>2</sup>, DONG Zhaorong<sup>1</sup>, CHE Zhao<sup>1</sup>

(1. School of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

2. Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Fangshan County, Lüliang City, Lüliang 033100)

**Abstract:** Nitrogen regulation measures are closely related to crop nitrogen uptake, utilization and yield, but the effects of different nitrogen regulation measures on nitrogen assimilation process in the main growth stage of maize still keep unclear. In this study, four treatments were set up: no nitrogen fertilizer (CK), traditional fertilizer application (CN), nitrogen fertilizer and biochar (SN) and nitrogen fertilizer and nitrification inhibitor DMPP (DN) by using Zhengdan 958 as materials, to analyze the effects of different nitrogen regulation on ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents, nitrate reductase (NR) and glutamine synthetase (GS) activities, free amino acid and soluble protein contents during the nitrogen assimilation, nitrogen utilization and the yield of maize. The results showed that both DN and SN treatments increased the nitrate nitrogen and ammonium nitrogen contents, NR and GS activities in maize plants compared with CN. Both DN and SN treatments significantly increased the contents of glutamate, free amino acid and soluble protein contents during the filling stage. Nitrogen accumulation in DN significantly increased by 18.4% and 30.0%, respectively than SN and CN in grains at the maturity stage. The yields of DN and SN increased by 1 483.0 and 1 154.2 kg·hm<sup>-2</sup>, respectively, as compared to CN. Both nitrogen regulation promoted nitrogen uptake in maize and significantly improved nitrogen fertilizer uptake and utilization efficiency. The nitrogen fertilizer uptake and utilization efficiency of DN was the highest and significantly higher than the other treatments. In conclusion, biochar or nitrification inhibitor with nitrogen fertilizer promoted the process of nitrogen assimilation and transport in the maize, and significantly improved the maize yield and nitrogen fertilizer use efficiency. Therefore, combining the yield, grain nitrogen accumulation and nitrogen fertilizer uptake efficiency, nitrification inhibitor with nitrogen fertilizer can

收稿日期: 2021-11-01

基金项目: 安徽省高等学校自然科学研究重点项目 (KJ2019A0177) 和安徽省自然科学基金 (2108085QC112) 共同资助。

作者简介: 戴馨, 硕士研究生。E-mail: 1762159375@qq.com

\* 通信作者: 车钊, 实验师。E-mail: cz17@ahau.edu.cn

be used as a high-yielding and efficient cultivation measure for maize in the Huaihe River Basin.

**Key words:** biochar; nitrification inhibitor; maize; yield; nitrogen assimilation process

为解决我国粮食需求, 高产增效成为我国近些年农业生产的目标, 化学肥料因为方便、高效而迅速成为主导肥源。据统计, 我国农田年平均氮肥施用量约为  $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [1], 远高于全球平均水平。大量化肥施用会造成土壤酸化, 并增加温室气体排放及硝酸根淋洗, 引发相关环境问题[2-4]。当前, 在确保作物产量的同时减少化肥的施用开始成为人们关注的焦点。玉米是我国最大的粮食作物, 常年播种面积达 41 万  $\text{km}^2$ , 部分区域玉米平均纯氮施用量高达  $288 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [5]。因此, 采取合理的氮素调控措施, 提高玉米氮素同化利用率和产量对我国粮食安全和环境安全具有重要意义。

与传统施肥相比, 生物炭或硝化抑制剂与尿素配施可以改变氮素在土壤中的释放、转化过程, 提高氮肥利用效率和作物产量, 是目前高效的氮素调控措施[6-8]。生物炭孔隙发达, 吸附性强, 能有效改善土壤结构和理化性质[9]。有研究表明, 生物炭能根据作物对氮素的需求调节土壤氮素的供应, 有效促进氮素的吸收同化, 降低作物体内的硝酸盐含量, 增加了氨基酸含量, 有利于作物提高产量[10]。适量的生物炭配施氮肥能够延缓土壤养分释放, 提高玉米根际土壤保水保肥能力, 显著提高了玉米产量和氮素利用率[11]。硝化抑制剂可以长时间抑制硝化作用, 有效抑制土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  向  $\text{NO}_3^--\text{N}$  转化, 提高土壤中铵态氮含量, 进而增强玉米生长后期土壤的供氮能力, 促进玉米铵态氮的吸收和籽粒的氮素积累, 同时增加玉米的百粒重和产量[12]。土壤氮素被植物吸收利用涉及吸收、转运和同化等诸多过程。其中氮同化过程和植物氮素利用效率密切相关, 是当前研究的热点。纵观当前研究多集中在生物炭和硝化抑制剂与普通尿素配施对作物产量和氮素利用率等方面的影响, 关于其对玉米主要生育时期氮素同化过程机理的研究鲜见报道。

淮河流域是我国粮食主产区, 也是夏播玉米的主要生产基地。但近年来安徽省淮河流域化肥利用率在 34.4% 左右, 低于全国玉米氮素利用率平均水平 35.2%[13]。本研究以郑单 958 为供试作物, 设置硝化抑制剂和生物炭与传统施肥方法配施处理, 研究不同氮素调控对玉米氮素同化过程中关键酶活性、铵态氮和硝态氮含量、游离氨基酸和可溶性蛋白以及氮素利用率和产量的影响, 以期为提高淮河流域玉米氮素利用率和产量提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2016 年 6 月在安徽省合肥市安徽农业大学国家高新技术农业园 ( $31^\circ 55' 59'' \text{N}$ ,  $117^\circ 12' 9'' \text{E}$ ) 进行, 该地属于亚热带湿润季风气候区, 年平均降水量约为 1 000 mm, 年平均气温为  $15.7^\circ \text{C}$ , 年平均日照约为 2 100 h。试验地土质为黄褐土, 有机质  $18.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 土壤 pH 为 6.4, 全氮  $1.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 碱解氮  $71.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效磷  $17.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全磷  $0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $190.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全钾  $32.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

本试验采用随机区组设计, 设不施氮肥 (CK)、传统施肥 (CN)、氮肥+生物炭 (SN)、氮肥+硝化抑制剂 (DN) 4 个处理, 每个处理 3 次重复, 小区长 5 m, 宽 3 m, 面积  $15 \text{ m}^2$ 。氮肥按当地传统施肥施氮量  $240.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 氮肥为尿素 (含 N 46%), 除 CK 处理外, 其他各处理氮肥施用量一致, 氮肥基追比为 3:7, 在玉米拔节期追肥。磷肥和钾肥作为基肥在播种前一次性施入, 磷钾肥施用量分别为  $\text{P}_2\text{O}_5$   $107.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $\text{K}_2\text{O}$   $112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 磷肥用  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量 17% 的过磷酸钙, 钾肥用  $\text{K}_2\text{O}$  含量 60% 的氯化钾, 各处理磷钾肥用量相同。生物炭原材料为水稻颖壳, 高温炭化后使用, 施用量  $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 在前茬小麦季一次施入。硝化抑制剂为 3,4-二甲基吡唑磷酸盐 (DMPP), 按照与尿素质量 1:100 的比例和尿素混合作为基肥施入。供试玉米品种为郑单 958, 于 2016 年 6 月 18 日播种, 种植密度为 6 万株  $\cdot \text{hm}^{-2}$ 。

### 1.3 测定项目和方法

分别在玉米拔节期 (jointing stage, JS)、大喇叭口期 (flare opening stage, OS)、抽雄期 (tasseling stage, TS)、开花期 (anthesis stage, AS) 和灌浆期 (filling stage, FS) 采集植株样品, 每小区选取具有代表性玉米 6 株, 其中 3 株取叶片和茎秆在  $-80^\circ \text{C}$  保存, 用于硝酸还原酶[14]、谷氨酰胺合成酶[15]、可溶性蛋白质含量、游离氨基酸含量、铵态氮及硝态氮含量的测定; 剩下 3 株将茎、叶和籽粒 (成熟期) 分开, 烘箱  $105^\circ \text{C}$  杀青 30 min、 $80^\circ \text{C}$  烘干至恒重, 测定全氮含量和干物质氮积累量。

籽粒产量的测定: 于玉米成熟期, 调查田间单位面积棒数, 每个小区随机取 20 棒带回室内考种测产; 可溶性蛋白质含量测定参考李合生[14]的菲林-

酚试剂法; 全氮含量采用半微量凯氏定氮法进行测定<sup>[16]</sup>; 游离氨基酸采用全自动专用氨基酸分析仪(L-8900, 日本); 植株铵态氮和硝态氮的测定参考研磨浸提法<sup>[17]</sup>; 干物质积累量测定: 样品 80 °C 烘干至恒重后取出, 称重后磨粉, 计算干物质积累量。

#### 1.4 数据处理与分析

氮素利用效率相关参数采用以下公式进行计算:

氮肥吸收利用率 = (施肥处理玉米地上部吸氮总量 - 不施肥玉米地上部吸氮总量) / 氮肥施用量 × 100%<sup>[18]</sup> (1)

氮素农学效率/(kg·kg<sup>-1</sup>) = (施肥处理作物的产量 - 不施肥处理作物的产量) / 氮肥施用量<sup>[18]</sup> (2)

氮素偏生产力/(kg·kg<sup>-1</sup>) = 施肥处理作物的产量 / 氮肥施用量<sup>[18]</sup> (3)

采用 Microsoft Excel 2010 和 Origin.2018 软件分析数据并制图, 并用 SPSS 19.0 软件对处理间进行差异性显著分析。

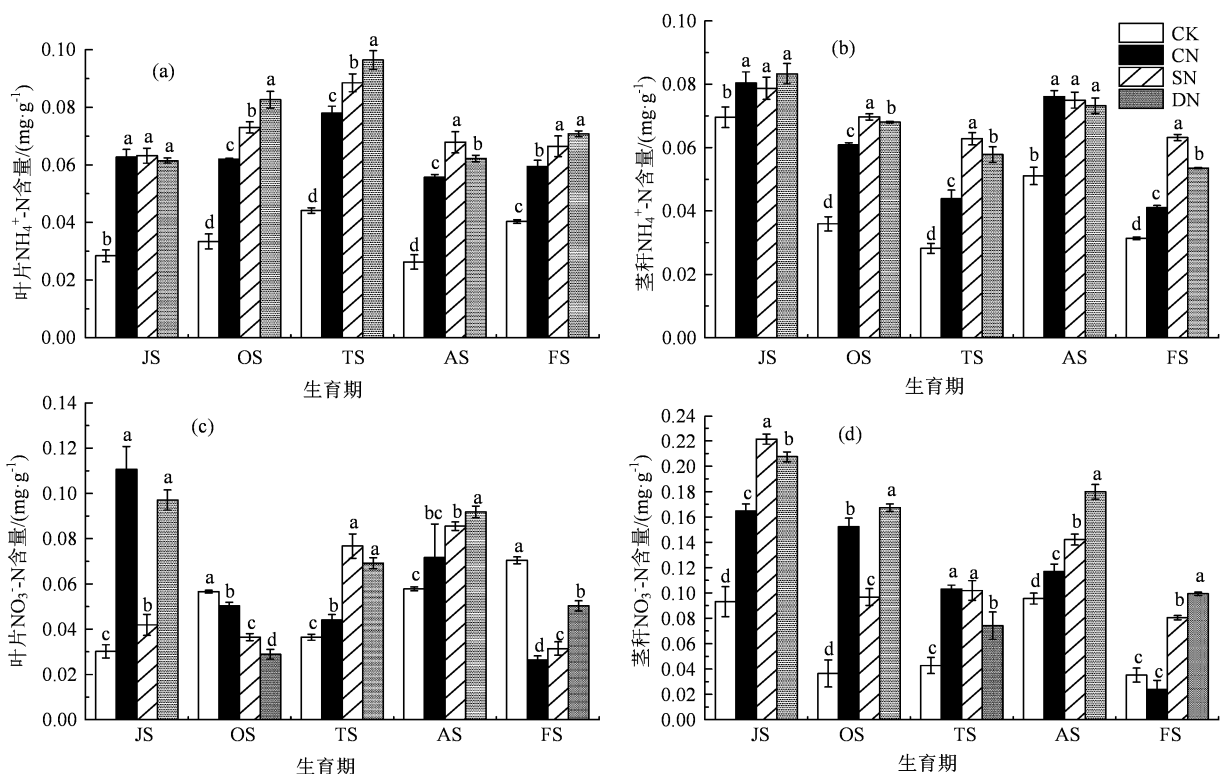
## 2 结果与分析

### 2.1 不同氮素调控对玉米氮同化的影响

2.1.1 对植株不同时期无机氮含量的影响 由图 1 (a) 可知, 从拔节期到开花期, 玉米叶片中铵态氮

含量呈先上升后下降, 开花期之后再上升的趋势。除拔节期, 其余时期 SN 和 DN 处理叶片的铵态氮含量均显著高于 CN 处理。抽雄期各处理叶片铵态氮含量最高, 其含量大小依次为 DN > SN > CN > CK, 其中 DN 和 SN 处理叶片的铵态氮含量分别比 CN 提高了 23.8% 和 13.6%。茎秆铵态氮含量的趋势正好相反 (图 1 (b))。在大喇叭口期、抽雄期和灌浆期, 铵态氮含量大小依次均为 SN > DN > CN > CK, 其中 SN 处理较 CN 处理分别显著高出 14.6%、43.1% 和 54.0%。

由图 1 (c) 可知, 从大喇叭口期到灌浆期, 各施氮处理硝态氮的含量呈先上升后下降的趋势。开花期至灌浆期, DN 处理硝态氮含量均显著高于 CN 处理, 分别高 28.1% 和 90.5%; 抽雄期至灌浆期, SN 处理硝态氮含量均高于 CN 处理, 除开花期, 其余两个时期均达显著水平。从图 1 (d) 可以看出, 茎秆硝态氮的含量从拔节期到开花期先下降后上升, 开花期之后再下降。除抽雄期外, DN 处理茎秆硝态氮的含量均显著高于 CN 处理。开花期至灌浆期, DN 处理茎秆硝态氮的含量最高, SN 处理次之, 显著高于其他处理, 其中灌浆期 DN 和 SN 处理分别是 CN 处理的 4.2 倍和 3.4 倍。



同一生育时期柱形图上方的不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。

JS: 拔节期; OS: 大喇叭口期; TS: 抽雄期; AS: 开花期; FS: 灌浆期。下同。

图 1 不同处理和不同生育时期玉米叶片和茎秆的铵态氮和硝态氮含量

Figure 1 The ammonium and nitrate nitrogen contents in maize leaf blade and stalk in different treatments and different fertility periods

### 2.1.2 对植株不同生育时期 NR 和 GS 的活性的影响

从图 2 可以看出, 叶片中酶活性较茎秆中酶活性高了一个数量级。由图 2 (a) 可知, 玉米叶片中各处理 NR 活性呈先上升再下降的趋势, 拔节期至大喇叭口期, SN 处理叶片 NR 活性显著高于 CN 处理, 是 CN 处理的 1.3 倍和 1.2 倍。在开花期各处理叶片 NR 活性最高, 活性大小依次为 DN > SN > CN > CK, 其中 DN 和 SN 处理分别比 CN 提高了 20.2%

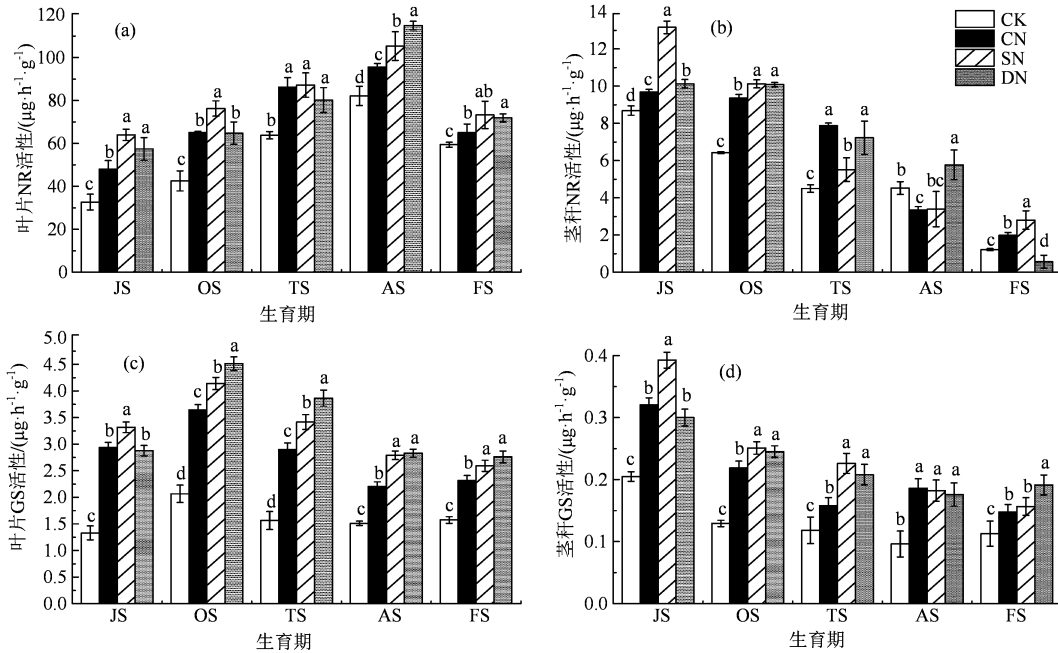


图 2 不同处理和不同生育时期玉米叶片和茎秆的 NR 和 SR 活性

Figure 2 The activities of NR and GS in maize leaf blade and stalk in different treatments and different fertility periods

表 1 不同氮素调控措施下玉米灌浆期叶片和茎秆的谷氨酸、游离氨基酸和可溶性蛋白含量

Table 1 The contents of free glutamic acid, amino acids and soluble protein in leaf blade and stalk of maize during filling period in different nitrogen control measures

| 部位 | 处理 | 谷氨酸含量/ $(\text{ng}\cdot\text{g}^{-1})$ | 游离氨基酸含量/ $(\text{ng}\cdot\text{g}^{-1})$ | 可溶性蛋白含量/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$ |
|----|----|--|--|--|
| 叶片 | CK | 223.7 <sup>b</sup>                     | 1 728.0 <sup>a</sup>                     | 6.1 <sup>d</sup>                         |
|    | CN | 194.2 <sup>c</sup>                     | 1 814.7 <sup>a</sup>                     | 7.3 <sup>c</sup>                         |
|    | SN | 278.1 <sup>a</sup>                     | 1 767.3 <sup>a</sup>                     | 8.7 <sup>b</sup>                         |
|    | DN | 229.1 <sup>b</sup>                     | 1 647.6 <sup>a</sup>                     | 8.8 <sup>a</sup>                         |
| 茎秆 | CK | 80.6 <sup>c</sup>                      | 1 105.8 <sup>d</sup>                     | 0.4 <sup>c</sup>                         |
|    | CN | 75.9 <sup>c</sup>                      | 1 442.5 <sup>c</sup>                     | 0.7 <sup>b</sup>                         |
|    | SN | 108.7 <sup>b</sup>                     | 2 042.9 <sup>b</sup>                     | 0.9 <sup>a</sup>                         |
|    | DN | 151.7 <sup>a</sup>                     | 3 014.6 <sup>a</sup>                     | 0.9 <sup>a</sup>                         |

注: 小写字母不同表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

各处理玉米叶片 GS 活性呈先上升后下降并趋于平稳的趋势 (图 2 (c))。整个生育时期, SN 处理 GS 活性均显著高于 CN 处理, 除了拔节期, 其他时期 DN 处理叶片 GS 活性均显著高于 CN 处理。

和 10.2%。从图 2 (b) 中可以看出: 整个生育时期, SN 处理 GS 活性均高于 CN 处理, 其中拔节期、大喇叭口期和开花期影响显著; 茎秆中 NR 活性则呈逐渐下降的趋势。拔节期至大喇叭口期, SN 处理茎秆 NR 活性显著高于 CN 处理, 是 CN 处理的 1.4 倍和 1.1 倍。拔节期各处理茎秆 NR 活性最高, 活性大小依次为 SN > DN > CN > CK, 其中 SN 和 DN 处理茎秆 NR 活性分别比 CN 提高了 36.0%和 4.6%。

在大喇叭口期, 各处理叶片 GS 活性均达到最大值, 活性大小依次为 DN > SN > CN > CK, 其中 DN 和 SN 处理分别比 CN 提高了 23.8%和 13.6%。从图 2 (d) 可以看出, 各处理茎秆 GS 活性呈逐渐下降趋于平稳的趋势。在拔节期, 各处理茎秆 GS 活性最高。拔节期至抽雄期, SN 处理茎秆 GS 活性均显著高于 CN 处理, 分别比 CN 提高了 22.8%、14.6%和 43.0%。灌浆期 DN 处理茎秆 GS 活性显著高于 CN 处理, 是 CN 处理的 1.3 倍。

**2.1.3 对玉米灌浆期谷氨酸、游离氨基酸和可溶性蛋白含量的影响** 由表 1 可知, SN 和 DN 处理灌浆期叶片的谷氨酸含量显著高于 CN 处理, 分别是 CN 处理的 1.5 倍和 1.2 倍, 茎秆中谷氨酸含量 DN 处理最高, SN 次之, 较 CN 处理分别提高了 100.0%和 43.2%。灌浆期各处理叶片游离氨基酸含量之间没有显著差异, 茎秆中游离氨基酸含量 DN 处理最高, 是 CN 处理的 2.1 倍。不同处理灌浆期叶片可溶性蛋白含量依次为 DN > SN > CN > CK, DN 和 SN 处

理较 CN 处理高出 19.8%和 17.8%。DN 处理茎秆的可溶性蛋白含量最高, SN 次之, 二者并无显著差异, 较 CN 处理提高了 30.3%和 25.0%。说明不同氮素调控能提高灌浆期玉米叶片和茎秆中谷氨酸、可溶性蛋白以及游离氨基酸的含量。

表 2 不同氮素调控措施下玉米开花期和成熟期氮素积累量  
Table 2 Nitrogen accumulation in maize at anthesis and maturity stages under different nitrogen control measures (kg·hm<sup>-2</sup>)

| 处理 | 开花期氮素积累           |                   | 成熟期氮素积累           |                    |                   |
|----|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
|    | 叶片                | 茎鞘                | 叶片                | 茎鞘                 | 籽粒                |
| CK | 15.4 <sup>d</sup> | 13.0 <sup>c</sup> | 6.1 <sup>d</sup>  | 8.3 <sup>d</sup>   | 55.1 <sup>c</sup> |
| CN | 27.4 <sup>c</sup> | 18.6 <sup>b</sup> | 19.6 <sup>b</sup> | 9.8 <sup>c</sup>   | 70.6 <sup>b</sup> |
| SN | 41.5 <sup>a</sup> | 20.9 <sup>a</sup> | 21.7 <sup>a</sup> | 10.7 <sup>bc</sup> | 77.5 <sup>b</sup> |
| DN | 38.9 <sup>b</sup> | 19.7 <sup>a</sup> | 16.3 <sup>c</sup> | 12.8 <sup>a</sup>  | 91.8 <sup>a</sup> |

2.1.4 对玉米花后氮素积累的影响 由表 2 可知, 开花期叶片氮素积累量表现为 SN > DN > CN > CK, SN 和 DN 处理较 CN 处理显著提高 51.4%和 42.0%; 开花期茎鞘的氮素积累量 SN 处理最高, 但与 DN 处理差异不显著, 二者显著高于 CN 处理。成熟期叶片氮素积累量依次为 SN > CN > DN >

CK; DN 处理茎鞘和籽粒中的氮素积累量最高且显著高于其他处理, 其中籽粒氮素积累量分别比 SN、CN 提高 18.4%和 30.0%。从表 2 中还可以看出, 从开花期到成熟期, 叶片和茎鞘中的氮素积累量随着生育时期逐渐减少, 硝化抑制剂处理显著提高了玉米花后茎鞘及籽粒的氮素积累量。

## 2.2 不同氮素调控对玉米产量和氮肥利用效率的影响

由表 3 可知, SN 和 DN 处理显著提高了玉米产量, DN 处理产量最高, 达 11 261.1 kg·hm<sup>-2</sup>, SN 处理次之, 二者并无显著差异且显著高于 CN 处理, 较 CN 处理分别增产 15.2%和 11.8%。与 CN 处理相比, 施用硝化抑制剂和生物炭均显著提高了玉米氮肥利用率。DN 处理氮肥利用效率最高达到 41.8%, 显著高于其他处理, 相较 SN 和 CN 处理分别提高了 10.0%和 28.3%; DN 处理氮肥农学效率和氮素偏生产力均为最高且显著高于 CN 处理, 但与 SN 差异不显著。说明不同氮素调控均可显著提高玉米产量及氮肥利用效率, 其中硝化抑制剂处理产量最高, 氮素利用率最高, 且与其他处理相比差异显著。

表 3 不同氮素调控措施玉米产量和氮肥利用效率

Table 3 Nitrogen fertilizer utilization efficiency and yield of maize among different nitrogen control measures

| 处理 | 籽粒产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 氮肥吸收利用率/%         | 氮肥农学效率/(kg·kg <sup>-1</sup> ) | 氮素偏生产力/(kg·kg <sup>-1</sup> ) |
|----|-----------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| CK | 8 598.2 <sup>c</sup>        |                   |                               |                               |
| CN | 9 778.0 <sup>b</sup>        | 32.6 <sup>c</sup> | 4.9 <sup>b</sup>              | 40.7 <sup>b</sup>             |
| SN | 10 932.3 <sup>a</sup>       | 38.0 <sup>b</sup> | 9.7 <sup>a</sup>              | 45.6 <sup>a</sup>             |
| DN | 11 261.1 <sup>a</sup>       | 41.8 <sup>a</sup> | 11.1 <sup>a</sup>             | 46.9 <sup>a</sup>             |

## 3 讨论与结论

本研究发现不同生育时期玉米体内无机氮的动态变化具有一定规律, 叶片中铵态氮和硝态氮含量分别在抽雄期和开花期达到峰值, 而茎秆中无机氮含量在拔节期和开花期达到峰值。前人研究发现拔节期和抽雄开花期分别是玉米营养生长和生殖生长的氮素吸收关键期<sup>[19]</sup>, 本试验中在拔节期追肥是拔节期植株体内无机氮含量升高的主要原因, 而开花期玉米叶片和茎秆硝态氮含量升高, 可能是因为玉米正处在从营养生长进入生殖生长的关键时期, 氮素吸收积累量大, 从而提高了体内硝态氮含量<sup>[20]</sup>。而作物体内的硝态氮或铵态氮是氮素同化过程合成氨基酸和蛋白质等植物生长发育所需的含氮有机化合物重要底物<sup>[21]</sup>。NR 和 GS 是植物体内氮素同化过程中的两个关键酶, NR 是植物体内硝态氮同化的关键限速酶<sup>[22]</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>作为 NR 的底物直接影响 NR 的

活性, 而 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>不仅是氮同化过程中 NR 的产物也是 GS 的底物, GS 促进植株 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>同化和氮素运转<sup>[23]</sup>。NR 和 GS 的活性大小在一定程度上反映了植物氮素的吸收和体内氮同化能力的强弱, 对植物生长发育、氨基酸含量、蛋白质含量和产量形成有重要影响<sup>[24]</sup>。前人研究发现, 施用生物炭对土壤中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>有较强的吸附能力, 能有效减少氮素流失, 从而延缓氮素释放, 提高氮肥利用率<sup>[10]</sup>, 硝化抑制剂与氮肥配施可以抑制硝化作用, 将土壤中的氮肥以 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的形式长期保存在土壤中, 减少土壤中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的含量<sup>[25]</sup>。有研究表明硝化抑制剂或生物炭与氮肥配施可以显著提高作物叶片 NR 和 GS 活性<sup>[25-27]</sup>。本研究也发现施用生物炭和硝化抑制剂均能提高玉米体内铵态氮和硝态氮含量, 促进了氮同化过程关键酶 NR 和 GS 活性。其原因可能是硝化抑制剂和生物炭的加入可以使土壤中铵态氮和硝态氮在玉米生长的关键时期保持较高的水平, 延缓土壤中氮素的释放, 有利于

玉米地上部对氮素的吸收利用,而氮素同化过程底物浓度的提高导致了玉米体内氮素同化关键酶 NR 和 GS 活性提高。

游离氨基酸和可溶性蛋白质是氮同化过程的中间产物<sup>[28]</sup>。本研究发现硝化抑制剂和生物炭与普通尿素配施可以使灌浆期玉米体内游离氨基酸、可溶性蛋白含量和主要器官氮积累量显著提高,这跟前人研究结果一致<sup>[29-30]</sup>。大多数研究表明, NR 和 GS 的活性对蛋白质与氨基酸含量影响显著<sup>[31-32]</sup>。本研究中,不同氮素调控均提高了玉米植株体内无机氮含量,进而提高了氮同化过程中 NR 和 GS 的活性,促使无机氮同化为氨基酸、蛋白质等含氮有机物,促进植株生长。

本研究中不同氮素调控处理下的玉米籽粒产量依次为: DN > SN > CN > CK,表明施用尿素的同时配施生物炭或硝化抑制剂可以显著提高玉米的产量,这与前人的研究结果相同<sup>[25, 27, 33-34]</sup>。同时本研究也发现硝化抑制剂和生物炭与普通尿素配施可以显著提高玉米氮肥吸收利用率、氮肥农学效率和氮素偏生产力。研究表明氮同化酶活性和作物产量、氮素利用效率显著正相关<sup>[35]</sup>。本研究也发现玉米生育期内硝化抑制剂和生物炭处理的 NR 和 GS 活性均高于传统施肥,氮同化产物游离氨基酸和可溶性蛋白和氮素积累量也显著高于传统施肥,说明硝化抑制剂和生物炭可以通过提高氮同化酶活性,增加氮同化产物,进而提高氮素利用率,增加作物产量。本研究中,虽然两种氮素调控均能促进氮素同化,提高氮素利用率和玉米产量,但施用硝化抑制剂籽粒氮素积累量和氮素利用率显著高于生物炭处理,说明在淮河流域玉米栽培施用硝化抑制剂的效果要好于生物炭,但关于硝化抑制剂和生物炭对其能否长期增产增效以及适宜氮肥配施比例等仍需要进一步研究。

综上,与传统施肥相比,氮肥配施生物炭和硝化抑制剂处理能提高玉米植株体内铵态氮和硝态氮含量,提高植物氮同化过程中关键酶硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的活性,促进玉米氮素的同化过程,进而提高氮素吸收利用率和玉米产量。综合产量、籽粒氮素积累量和氮肥吸收利用率,硝化抑制剂配施氮肥可作为淮河流域玉米高产高效的栽培措施。

## 参考文献:

- [1] STOCKER T F. Climate change 2013: the physical science basis: working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] CUI S H, SHI Y L, GROFFMAN P M, et al. Centennial-scale analysis of the creation and fate of reactive nitrogen in China (1910-2010)[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2013, 110(6): 2052-2057.
- [3] 马洪斌, 李晓欣, 胡春胜. 中国地下水硝态氮污染现状研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1532-1536.
- [4] 唐汉, 王金武, 徐常塑, 等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 1-19.
- [5] 常艳丽, 刘俊梅, 李玉会, 等. 陕西关中平原小麦/玉米轮作体系施肥现状调查与评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 51-61.
- [6] 张英鹏, 李洪杰, 刘兆辉, 等. 农田减氮调控施肥对华北潮土区小麦-玉米轮作体系氮素损失的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1179-1187.
- [7] 苑晓辰, 任奕林, 彭春晖, 等. 一种生物炭基肥包膜材料的制备及特性研究[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(1): 110-116.
- [8] 潘复燕, 薛利红, 卢萍, 等. 不同土壤添加剂对太湖流域小麦产量及氮磷养分流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 928-936.
- [9] 计海洋, 汪玉瑛, 刘玉学, 等. 生物炭及改性生物炭的制备与应用研究进展[J]. 核农学报, 2018, 32(11): 2281-2287.
- [10] 俞映惊, 薛利红, 杨林章, 等. 生物炭添加对酸化土壤中小白菜氮素利用的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 759-767.
- [11] 孟繁昊, 于晓芳, 王志刚, 等. 生物炭配施氮肥对土壤物理性质及春玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2020, 28(1): 142-150.
- [12] 孙爱文, 石元亮, 朱志锋, 等. 硫脲及抑制剂组合对土壤尿素氮转化和玉米产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 481-486.
- [13] 安徽省农业农村厅. 安徽土肥信息(第十一期)2016年全省化肥施用减量增效凸显[EB/OL].[2017-03-08]. <http://nync.ah.gov.cn/rdzt/trfl/11268121.html>.
- [14] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 125.
- [15] ZHANG C F, PENG S B, BENNETT J. Glutamine synthetase and its isoforms in rice spikelets and rachis during grain development[J]. J Plant Physiol, 2000, 156(2): 230-233.
- [16] 谢小玲, 李海锋, 李雪莹, 等. 土壤全氮半微量定氮法与自动定氮仪定氮法的比较分析[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1071-1074.
- [17] VAN ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, et al. Influence of biochars on flux of N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> from ferrosol[J]. Soil Res, 2010, 48(7): 555.
- [18] 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.
- [19] 冯小杰, 战秀梅, 王雪鑫, 等. 包膜尿素不同配比减施对土壤无机氮含量及玉米氮素吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(10): 1733-1745.
- [20] 刘弋菊, 孔箐箐, 苏胜宝. 玉米氮素代谢机制的研究进展[J]. 玉米科学, 2009, 17(1): 135-138.
- [21] 张华珍, 徐恒玉. 植物氮素同化过程中相关酶的研究进展[J]. 北方园艺, 2011(20): 180-183.

- [22] 杨阳, 刘灿华, 葛树春, 等. 减量配施新型基质缓释肥对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(3): 442-447.
- [23] 宋航, 周卫霞, 袁刘正, 等. 光、氮及其互作对玉米氮素吸收利用和物质生产的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(12): 1844-1852.
- [24] 于方明, 刘可慧, 荣湘民, 等. 生长调节剂对春玉米氮素代谢关键酶活性的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(4): 1253-1256.
- [25] 刘国玲, 王宏伟, 蒋健, 等. 生物炭对郑单 958 生理生化指标及产量的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(4): 105-109.
- [26] 王彬, 王玉波, 佟桐, 等. 不同施氮模式对玉米光合特性和氮代谢关键酶的影响[J]. 玉米科学, 2020, 28(2): 135-142.
- [27] 杨磊, 夏炎, 韩自强, 等. 氮素调控措施对小麦植株氮素同化过程和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(10): 1195-1201.
- [28] 吴雅薇, 赵波, 杜伦静, 等. 低氮胁迫对不同氮效率玉米品种苗期叶片碳氮代谢的影响[J]. 玉米科学, 2019, 27(6): 74-83.
- [29] 郭艳杰, 王小敏, 牛翠云, 等. 2 种氮源与双氰胺配施对温室芹菜氮素吸收和营养品质的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 149-154.
- [30] 高德才, 刘强, 张玉平, 等. 添加生物黑炭对玉米产量、品质、肥料利用率及氮磷径流损失的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(5): 72-76.
- [31] 许光利, 刘佳, 梁成刚, 等. 灌浆结实期弱光对水稻籽粒氮代谢酶及蛋白质含量的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2016, 42(1): 53-62.
- [32] 姜红芳, 兰宇辰, 李猛, 等. 氮肥运筹对盐碱地水稻籽粒氮代谢关键酶活性和蛋白质含量的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(S1): 213-220.
- [33] 张文学, 杨成春, 王少先, 等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田土壤氮素转化的影响[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(4): 417-424.
- [34] 房彬, 李心清, 赵斌, 等. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(8): 1292-1297.
- [35] 王小纯, 王晓航, 熊淑萍, 等. 不同供氮水平下小麦品种的氮效率差异及其氮代谢特征[J]. 中国农业科学, 2015, 48(13): 2569-2579.

## 安徽农业大学在杨树木材化学组成的快速定量预测领域取得系列新进展

杨树是全球栽植面积最广的人工林树种,也是我国第一大速生人工林栽培树种和用材树种。杨树木材主要化学成分含量的检测技术对于林木遗传育种、森林经营方案优化、木材高效利用和固碳效率研究意义重大。但常规测定所使用湿化学方法存在测试耗时多、效率低、样品用量多和消耗大量化学品造成环境污染等问题。

为了解决这一技术“瓶颈”,安徽农业大学“林木材质改良与高效利用”国家林业和草原局重点实验室刘盛全课题组与长三角地区上海科技大学凌盛杰教授课题组合作,通过采集 150 组不同杨树木粉的傅里叶变换拉曼光谱并对其进行处理和提取,再基于多种化学计量学方法,建立了一系列预测模型,实现了对杨树木材综纤维素和木质素含量的快速定量预测。相关研究成果今年先后在国际高水平期刊《生物质技术》(Bioresource Technology)、《碳水化合物》(Carbohydrate Polymers)、《工业作物与产品》(Industrial crops & products)和《纤维素》(Cellulose)连续发表了 5 篇高水平学术论文。

此项研究工作首先通过降维算法和正则化算法建立了基于傅里叶变换拉曼光谱对杨树木材综纤维素和木质素的定量预测模型。模型质量评价结果表明上述模型已经达到了实际应用级别。通过对模型比较,确定了综纤维素定量模型中拉曼光谱的最佳内标峰位于 2945 $\text{cm}^{-1}$ ,木质素定量模型中拉曼光谱的最佳内标峰位于 2895 $\text{cm}^{-1}$ 。其次,借鉴机器学习算法在工业产品工艺优化和产品性能测定等方面的应用,利用多种机器学习算法结合拉曼光谱技术分别构建了杨树木材木质素和综纤维素含量的定量预测模型,分别获得了预测精度较高、稳定可靠的综纤维素和木质素的定量预测模型,其中,基于 XGBoost 算法构建的综纤维素和木质素定量预测模型的决定系数  $R^2$  均 $\geq 0.92$ ,均方根误差  $RMSE \leq 0.37$ 。这也是目前利用拉曼光谱定量预测木材化学成分含量研究中最好的模型评价结果。

上述研究论文第一作者均为“林木材质改良与高效利用”国家林业和草原局重点实验室 2022 届木材科学与技术博士研究生高文丽,林学与园林学院副教授周亮为共同第一作者及共同通讯作者,林学与园林学院教授刘盛全为共同通讯作者,安徽农业大学为第一通讯单位。该研究得到国家重点研发计划课题“速生人工林木材品质性状的遗传基础(2017YFD0600201)”和国家自然科学基金等项目(31770596)的资助。上述论文的相关研究成果同时也申请了国家发明专利。