

## 施氮模式对玉-麦周年轮作系统产量和氮吸收利用的影响

李岚涛, 任丽, 尹焕丽, 郭娅, 王海标, 张倩, 王宜伦

引用本文:

李岚涛, 任丽, 尹焕丽, 等. 施氮模式对玉-麦周年轮作系统产量和氮吸收利用的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(11): 1682-1694.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190223>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 腐植酸与氮肥配施对冬小麦氮素吸收利用及产量的影响

Effect of combined application of humic acid and nitrogen fertilizer on nitrogen uptake, utilization and yield of winter wheat  
中国生态农业学报. 2017, 25(3): 365-372 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160700>

#### 不同缓/控释尿素在黄土台塬区春玉米的减量施用效果

Effect of different rates of slow/controlled release urea on nitrogen content in spring maize in loess highlands  
中国生态农业学报. 2017, 25(6): 848-855 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.161122>

#### 滴灌水肥一体化条件下施氮量对夏玉米氮素吸收利用及土壤硝态氮含量的影响

Effects of nitrogen application rate on nitrogen absorption and utilization in summer maize and soil NO<sub>3</sub>-N content under drip fertigation  
中国生态农业学报. 2018, 26(5): 668-676 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170416>

#### 减氮配施控释尿素对水稻产量和氮肥利用的影响

Effect of combined application of controlled-release urea and conventional urea under reduced N rate on yield and N utilization efficiency of rice  
中国生态农业学报. 2017, 25(6): 829-838 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160836>

#### 华北典型区域土壤耕作方式对土壤特性和作物产量的影响

Soil tillage practices affecting the soil characteristics and yield of winter wheat and summer maize in North China  
中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(11): 1663-1672 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190246>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190223

李岚涛, 任丽, 尹焕丽, 郭娅, 王海标, 张倩, 王宜伦. 施氮模式对玉-麦周年轮作系统产量和氮吸收利用的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(11): 1682–1694

LI L T, REN L, YIN H L, GUO Y, WANG H B, ZHANG Q, WANG Y L. Effects of nitrogen application methodologies on yield and nitrogen use efficiencies in a summer maize (*Zea mays*)-winter wheat (*Triticum aestivum*) rotation system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(11): 1682–1694

## 施氮模式对玉-麦周年轮作系统产量和氮吸收利用的影响\*

李岚涛, 任丽, 尹焕丽, 郭娅, 王海标, 张倩, 王宜伦\*\*

(河南农业大学资源与环境学院 郑州 450002)

**摘要:** 为明确适宜豫北平原夏玉米-冬小麦一体化种植的高效施氮管理模式, 2016—2017年分别在豫北典型高产田区河南省鹤壁市和中产田区河南省原阳县开展了夏玉米-冬小麦周年轮作不同施氮模式对夏玉米与冬小麦产量、氮素吸收和利用效率影响的田间试验。共设5种处理: 不施氮肥(T1)、普通尿素按210 kg(N)·hm<sup>-2</sup>一次性基施(T2)、普通尿素分次施用且总施氮量同T2(T3)、控释尿素与普通尿素配比氮素减量施用(T4)和控释尿素与普通尿素配比氮素足量施用(T5)。分别于夏玉米和冬小麦关键生育期测试叶片 SPAD 值、植株与籽粒氮含量及生物量等氮营养指标, 并于成熟期测定产量和产量构成因子, 分析计算植株氮积累与吸收利用特征。结果表明, 处理间, 高、中产区夏玉米与冬小麦产量、产量构成因子及氮素营养指标整体变化趋势均为 T5>T4>T3>T2>T1。产区间, 各处理夏玉米和冬小麦产量性状及氮营养指标均表现为高产区显著优于中产区。综合各处理平均值, 高产区夏玉米产量、植株氮含量和氮素积累量相比于中产区分别平均提高58.0%、19.2%和47.1%, 冬小麦增幅则分别为34.7%、33.3%和85.9%。氮利用效率方面, 高、中产区在氮肥表观利用率、氮肥农学效率和100 kg籽粒需氮量变化趋势均表现为 T5>T4>T3>T2>T1, 处理间差异显著; 氮素收获指数则与此相反。豫北平原夏玉米-冬小麦周年轮作制在作物稳产甚至增产条件下, 采用尿素与缓释氮肥掺混配施的氮肥优化施用模式不仅可有效减少肥料用量, 还能显著提升肥料利用率, 降低氮肥损失。

**关键词:** 夏玉米-冬小麦轮作; 高、中产区; 尿素; 缓释氮肥; 氮肥利用率

中图分类号: S146; S513

文章编号: 2096-6237(2019)11-1682-13

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



## Effects of nitrogen application methodologies on yield and nitrogen use efficiencies in a summer maize (*Zea mays*)-winter wheat (*Triticum aestivum*) rotation system\*

LI Lantao, REN Li, YIN Huanli, GUO Ya, WANG Haibiao, ZHANG Qian, WANG Yilun\*\*

(College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** This research was conducted to explore an appropriate nitrogen (N) management pattern for a summer maize (*Zea mays*)-winter wheat (*Triticum aestivum*) rotation system (SM-WW) and to study the effects of N application methodologies on

\* 国家科技支撑计划项目(2015BAD23B02)资助

\*\* 通信作者: 王宜伦, 主要从事作物营养与高效施肥技术方面研究。E-mail: wangyilunr@henau.edu.cn

李岚涛, 主要从事作物养分精准管理方面研究。E-mail: lilantao@henau.edu.cn

收稿日期: 2019-03-27 接受日期: 2019-06-14

\* This work was funded by the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2015BAD23B02).

\*\* Corresponding author, E-mail: wangyilunr@henau.edu.cn

Received Mar. 27, 2019; accepted Jun. 14, 2019

crop yields and N use efficiencies in a SM-WW in high and medium yield areas of Henan Province, North China. An appropriate N management strategy was analyzed and established in this study. The detailed N application strategies for the SM-WW were as follows: (i) no N application (T1); (ii) one-off application of urea with the rate of  $210 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$  (T2); (iii) fractional application of urea with the rate of  $210 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$  (T3); (iv) combined application of controlled-release N fertilizer with urea at the rate of  $180 \text{ kg (N)} \cdot \text{hm}^{-2}$  for wheat and  $195 \text{ kg (N)} \cdot \text{hm}^{-2}$  for maize (T4); (v) combined application of controlled-release N fertilizer with urea at the rate of  $210 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$  for wheat and maize (T5). The Soil-Plant Analyses Development (SPAD) chlorophyll meter (Minolta Camera Co., Japan) was used to determine SPAD values. Plant and/or grain N content and biomass were measured at different growth stages for the SM-WW and used to calculate different N indicators. Results showed that N fertilization methodologies could significantly affect the yield, yield components, and N indicators among the five treatments, with the overall trend being  $T5 > T4 > T3 > T2 > T1$ . Moreover, the yield and N parameters in high-yield area were significantly higher than those in medium-yield area. Compared with the medium-yield condition, the average values among the five treatments for yield, plant N content, and accumulation increased by 58.0%, 19.2%, and 47.1% for maize and 34.7%, 33.3%, and 85.9% for wheat, respectively, under high-yield conditions. Regarding the N use efficiencies, from T1 to T5, apparent N use efficiency, agronomic N use efficiency, and N absorption amount for producing 100 kg of grain were increased both in the high- and medium-yield areas. However, the opposite trend was found for N harvest index. The results showed that an optimal N fertilization treatment, such as T4 or T5, had great potential in improving N use efficiency without adversely affecting grain yield and could be an appropriate model of N nutrient application during the SM-WW in Henan Province, China.

**Keywords:** Summer maize-winter wheat rotation system; High- and medium-yield area; Urea; Slow-release nitrogen fertilizer; Nitrogen use efficiency

夏玉米(*Zea mays*)-冬小麦(*Triticum aestivum*)轮作(玉-麦轮作)是黄淮海平原典型的一年两熟制粮食作物栽培模式,也是我国粮食高产以及超高产创建的核心产区<sup>[1-2]</sup>。氮(N)是玉米、小麦生命繁衍、成长和发育所必需的三大营养元素之一,也是玉-麦轮作体系变化的主控因子<sup>[3-4]</sup>。研究表明,黄淮海玉-麦轮作区在氮肥管理上随意性很高,玉米、小麦两季作物施氮时极少考虑氮肥的盈余量,其氮肥偏生产力均在  $10 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  左右,大田实际生产中则可能更低<sup>[5]</sup>,远低于国际上的  $18 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $24 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[6]</sup>。同时我国玉米、小麦生产中其氮肥用量明显高于国际上相应的平均水平,按照作物报酬递减率,相对应的每千克氮肥所增加的产量效应必然会有所降低<sup>[7-8]</sup>。因此,增强农田氮素管理水平,优化氮素施用模式是降低氮素损失、提高氮素利用率的重要途径<sup>[9]</sup>。其中一项重要措施则是研发新型肥料并推广使用绿色、高效施氮技术<sup>[10-11]</sup>。杨峰等<sup>[12]</sup>利用 2 年田间试验研究指出,采用缓控释肥一次性基施模式的夏玉米产量接近或高于常规尿素 3 次和 2 次施肥,增产效果优于一次性基施等量普通复合肥处理。此外,在同等施氮量下,与普通尿素相比,施用缓释尿素水稻氮素利用率可提高 20%以上,且在氮肥减施 30%条件下其产量仍比施用普通尿素提高 3.0%~5.9%<sup>[13]</sup>。另有研究指出,采用控释肥与尿素配施的施肥模式不仅可有效满足前期作物生长对养分需求<sup>[14]</sup>,又能确保作物稳产甚至高产<sup>[15]</sup>,同时还可有效减少旱地  $\text{N}_2\text{O}$  及水田  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  的排放<sup>[16-17]</sup>。因此,制定因时、因地的玉-麦周年轮作体系

下合理的施氮模式,对提高黄淮海平原粮食产量、氮肥利用率以及降低环境污染风险和节本增效等均具有重要意义。

前人有关作物氮肥施用模式的研究主要集中于“4R 施肥技术”(正确的施肥量、施肥时期、施肥方法和施肥地点)的用量、时期和方法方面,而很少考虑地力水平不同所造成的差异。冯洋等<sup>[18]</sup>通过布置水稻(*Oryza sativa*)氮肥效应田间试验,发现高产田与中产田对氮肥响应灵敏度明显弱于低产田,且地力水平间适宜施氮量变化趋势为低产田>中产田>高产田。研究表明,同等施氮模式下,高产田氮素利用率较中、低产田更低<sup>[19]</sup>。河南省位于黄淮海平原腹地,地域跨度大,各粮食产区间地力水平参差不齐。宋艳华等<sup>[20]</sup>调查指出,河南省高、中、低产田比例分别占全省耕地面积的 20%、50%和 30%左右,其中,高产田区农业科技条件对作物产量贡献低于中、低产田,而中、低产田区的耕地质量、施肥技术和管理水平对作物产量的贡献均远低于高产田区。研究发现,每公顷高产田作物产量相当于 1.4~3.8 倍或 2.1~6.0 倍的中、低产田,同时高产田对我国粮食贡献率高达 54.1%<sup>[21]</sup>,未来作物粮食增产的核心仍然为中、高产田<sup>[22]</sup>。因此,有效开展因时、因地和因量的玉-麦轮作体系氮肥施用模式研究,对制定科学、合理的农田养分管理技术意义重大。基于此,本文以豫北典型的玉-麦周年轮作种植模式为研究对象,选取代表性高产田区(河南省鹤壁市)与中产田

区(河南省原阳县)布置并开展不同氮肥施用模式下玉-麦轮作田间试验,探究不同氮肥施用措施对玉-麦周年轮作模式下作物产量、氮素吸收利用以及物质分配与转运特性影响,以期对玉-麦一体化栽培中节氮增效潜力空间分析及制定适宜的氮肥施用技术提供试验基础与理论支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验点概况

2016 年 6 月—2017 年 10 月,分别于河南省鹤壁市高产粮示范区(114°18'E, 35°40'N, 高产区)和新

乡市原阳县河南农业大学试验基地(113°56'E, 35°6'N, 中产区)选取代表性田块开展玉-麦轮作下氮肥施用模式肥效试验。两地均属于温带半湿润性季风气候,多年平均气温和降雨量分别为 14.5 和 650 mm 左右。供试土壤鹤壁为黏壤质潮土,原阳是砂质潮土,0~20 cm 耕层土壤基础理化性质如表 1 所示。分析发现,除 pH 高产区(鹤壁)低于中产区(原阳)外,其余 5 项土壤养分指标均显著高于后者,有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾增幅分别高达 49.4%、53.7%、20.6%、94.7%和 56.9%。

表 1 供试地土壤基本理化性质  
Table 1 Soil physical-chemical properties of the experimental sites

地点 Site	pH	有机质 Organic matter (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Available N (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available P (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K (mg·kg <sup>-1</sup> )
高产区 High-yield condition	7.3	23.0	1.26	87.9	36.8	166.3
中产区 Medium-yield condition	7.8	15.4	0.82	72.9	18.9	106.0

### 1.2 试验设计

高、中产区夏玉米与冬小麦大田试验均设 5 种氮肥施用模式,具体信息如表 2 所示。

其中, T3 处理中冬小麦季按基肥 返青肥=1 1 施用,夏玉米季按基肥 大喇叭口期追肥=1 1 施入; T4 中冬小麦季按包膜尿素 普通尿素=3 1 配方于播种前一次性基施,夏玉米季采用含 N 26%的包膜尿素按 750 kg·hm<sup>-2</sup>于播种时一次性施入; T5 处理中冬小麦季包膜尿素与普通尿素仍按 3 1 于播种前一次性施入,夏玉米季采用含 N28%的包膜尿素按 750 kg·hm<sup>-2</sup>于播种时一次性施入。各处理均设 3 次重复,随机区组排列。小区面积 36.0 m<sup>2</sup>(宽×长=3.6 m×10.0 m)。除氮肥外,磷、钾肥用量分别按 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg·hm<sup>-2</sup>和 K<sub>2</sub>O 75 kg·hm<sup>-2</sup>做基肥一次性施入。肥

料品种分别为普通尿素(含 N 46%)、ESN 树脂包膜尿素(含 N 44%)、过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)和氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 60%)。

供试夏玉米和冬小麦品种均为国审主推高产新品种,在试验区具有广泛的推广种植面积和环境适应性。其中,夏玉米品种高产区为‘豫安 3 号’,中产区为‘浚单 29’,种植密度为 67 500 株·hm<sup>-2</sup>;冬小麦品种高产区为‘淮麦 33’,中产区为‘设农 999’,两地播种密度分别为 210 kg·hm<sup>-2</sup>和 180 kg·hm<sup>-2</sup>。播种以及收获日期:高产区夏玉米 2016 年 6 月 17 日播种,9 月 29 日收获,小麦 11 月 4 日播种,2017 年 6 月 8 日收获。中产区冬小麦 2016 年 10 月 16 日播种,2017 年 6 月 2 日收获;夏玉米 6 月 7 日播种,9 月 28 日收获。除草、灌溉、除虫喷雾等其他田间管理措施均与当地农户习惯一致。

表 2 试验各处理具体信息  
Table 2 Detailed information of different treatments in the experiment

处理 Treatment	具体信息 Detail information
T1	不施氮肥 No N application
T2	普通尿素一次性基施,施氮量为 210 kg(N)·hm <sup>-2</sup> One-off application of urea with the rate of 210 kg(N)·hm <sup>-2</sup>
T3	普通尿素分次施用,施氮量为 210 kg(N)·hm <sup>-2</sup> Fractional application of urea with the rate of 210 kg(N)·hm <sup>-2</sup>
T4	控释尿素与普通尿素配比施用模式之氮素减量施用,冬小麦季和夏玉米季施氮量分别为 180 kg(N)·hm <sup>-2</sup> 和 210 kg(N)·hm <sup>-2</sup> Combined application of controlled-release N fertilizer and urea with the rate of 180 kg(N)·hm <sup>-2</sup> for winter wheat and 195 kg(N)·hm <sup>-2</sup> for summer maize
T5	控释尿素与普通尿素配比施用模式之氮素足量施用,冬小麦季和夏玉米季施氮量均为 210 kg(N)·hm <sup>-2</sup> Combined application of controlled-release N fertilizer and urea with the rate of 210 kg(N)·hm <sup>-2</sup> for winter wheat and summer maize

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 基础土样采集与分析

分别于夏玉米和冬小麦播种施肥前, 采用“S 型”取样法采集试验地 0~20 cm 耕层土壤样品, 风干后过 20 目与 100 目筛, 分别测定土壤 pH(电极法水土比 2.5:1)、有机质( $K_2Cr_2O_7$  容量-外加加热法)、全氮(半微量开氏法)、碱解氮(碱解扩散法)、速效磷( $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$  法)和速效钾( $\text{NH}_4\text{OAc}$  浸提, 火焰光度法)含量(表 1)。

#### 1.3.2 植株样品采集与分析

分别于高产区夏玉米播种后 27 d(六叶期)、46 d(十叶期)、61 d(十四叶期)、70 d(吐丝期)、76 d(水泡期)、91 d(乳熟期)和 104 d(成熟期), 中产区夏玉米播种后 33 d、54 d、69 d、76 d、85 d、101 d 和 113 d(生育期同高产区); 高产区冬小麦播种后 105 d(越冬期)、137 d(拔节期)、160 d(抽穗期)、182 d(灌浆期)和 216 d(成熟期), 中产区冬小麦播种后 94 d、146 d、156 d、178 d、201 d(乳熟期)和 229 d(生育期同高产区), 各小区选择有代表性夏玉米与冬小麦各 20 株, 于光照充足、太阳高度角变化较小的上午 10:00—12:00, 利用叶绿素计 SPAD 仪测定夏玉米最新完全展开叶和冬小麦旗叶 SPAD 值, 同一小区内测试结果求取平均值。

叶片 SPAD 值测定结束后, 各小区选取有代表性玉米 4 株和 1 m 双行小麦样方 1 处, 夏玉米吐丝期前不分部位, 吐丝期后分植株与籽粒两部分; 冬小麦除成熟期外, 均未分部位进行样品采集与前处理。处理后样品先置于 105℃ 烘箱中杀青 30 min, 后置于 65℃ 烘箱中烘至恒重, 计算生物量。 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  法消煮, AA3 流动注射分析仪测定植株和籽粒氮含量( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 计算氮素积累量, 即各部位生物量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )与氮含量( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )的乘积。

#### 1.3.3 测产与考种

于夏玉米和冬小麦收获期, 于各小区测产区选取长势均匀的玉米和小麦样方  $10.8 \text{ m}^2$ (宽 $\times$ 长=3.6 m $\times$ 3.0 m), 自然风干后于实验室内考种分析, 测定穗粒数和千粒重, 并测算小麦样方内有效穗数; 采用 PM-8188-A 型谷物水分测定仪测试夏玉米和冬小麦籽粒含水量, 换算成 14.0%含水量的作物产量。

### 1.4 数据处理与分析

按照黄明等<sup>[23]</sup>和鲁艳红等<sup>[24]</sup>描述方法分别计算夏玉米和冬小麦氮肥表观利用率(apparent use efficiency of nitrogen, AUN, %)、氮肥农学效率(agronomic efficiency of nitrogen, AEN,  $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、100 kg 籽粒需氮量[nitrogen amount for producing 100 kg grains, NAPG,  $\text{kg}\cdot(100\text{kg})^{-1}$ ]和氮素收获指数(nitrogen

harvest index, NHI):

$$\text{AUN}(\%) = (\text{施氮处理地上部氮积累量} - \text{对照处理地上部氮积累量}) / \text{施氮量} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{AEN}(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}) = (\text{施氮处理作物产量} - \text{对照处理作物产量}) / \text{施氮量} \quad (2)$$

$$\text{NAPG}[\text{kg}\cdot(100\text{kg})^{-1}] = \text{植株总氮积累量} / \text{籽粒产量} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{NHI} = \text{籽粒氮积累量} / \text{地上部氮积累量} \times 100 \quad (4)$$

采用 Microsoft Excel 2010 进行基础数据输入与前期处理; SPSS 20.0 软件进行试验点与氮肥施用模式处理间方差分析和显著性检验(LSD 法), 显著性水平设定为  $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$  和  $P < 0.001$ ; Origin 8.5 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮肥施用模式对玉-麦周年轮作系统作物产量及产量构成因子的影响

玉-麦周年轮作下不同氮肥施用模式对产量及产量构成因子影响显著(图 1)。夏玉米产量, 2016—2017 年高产区与中产区田块均以 T5 处理(控释尿素与普通尿素配比施用)最高, 相比于 T1(不施氮肥)处理, 产量增幅分别为 37.2%和 34.3%, 差异显著。冬小麦产量, 不同氮肥施用模式产量变化趋势与夏玉米相似, 仍以 T5 最高, T4 次之, T1 最低。进一步分析可知, 两试验年份高产区田块不同氮肥施用模式作物产量均高于中产区田块的相应处理, 其中高产区夏玉米和冬小麦产量与中产区相比, 分别平均提高 58.0%和 34.7%。交互作用方差分析结果表明, 试验点(S)和处理(T)对作物产量影响均达极显著水平( $P < 0.001$ )。

由表 3 可知, 氮肥施用模式和试验点对夏玉米和冬小麦产量构成因子影响较为明显, 但各指标间表现出较大的差异性。高产区夏玉米处理间穗粒数、冬小麦穗数和穗粒数差异均达显著水平( $P < 0.05$ ), 千粒重则无明显差异; 中产区变化趋势与此一致。进一步分析发现, 试验点和处理互作(S $\times$ T)无显著影响, 该结果与产量分析效应相同。主要原因可能是交互作用分析时高产区与中产区各指标在数值大小上差异较大, 变异系数的提高降低了互作分析的灵敏度与响应度。

### 2.2 氮肥施用模式对玉-麦周年轮作体系作物叶片 SPAD 值的影响

叶片 SPAD 值是反映作物色素含量及光合潜力的重要指标, 与氮素营养关系紧密, 可直接用于表征植株氮含量丰缺状况, 评估氮肥施用效果。图 2 为玉-麦轮作下高、中产区不同氮肥施用模式叶片

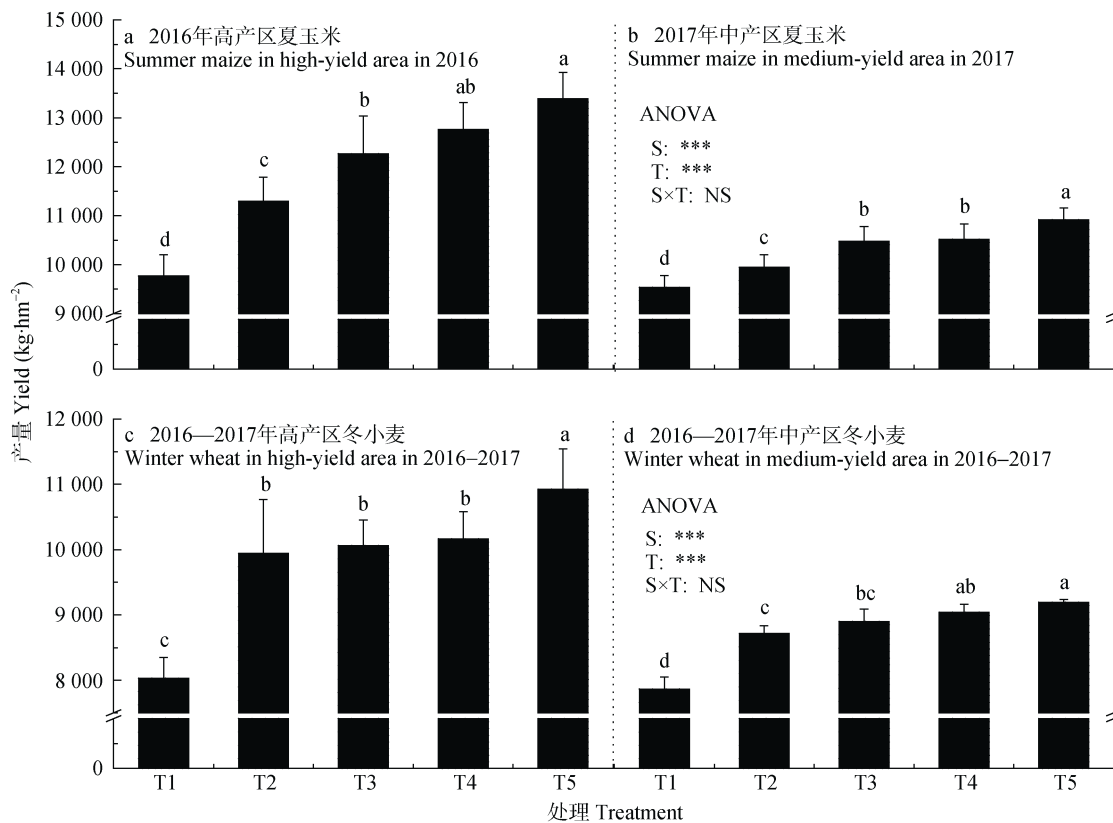


图 1 氮肥施用模式对高产区和中产区夏玉米-冬小麦周年轮作系统作物产量的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen application methods on crop yields of the summer maize-winter wheat rotation system in high- and medium-yield areas

各处理具体介绍见表 2。小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。NS 和\*\*\*分别表示试验地点、处理及其交互作用不显著和在 0.001 水平上显著。Detailed information of treatments was shown in Table 2. Different letters above columns mean significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ). NS and \*\*\* represent not significant effect, significant effect at 0.001 probability levels, respectively, of experimental sites, treatments and theirs interactions.

表 3 氮肥施用模式对高产区和中产区夏玉米-冬小麦周年轮作系统作物产量构成因子的影响

Table 3 Effects of nitrogen application methods on yield components of crops of the summer maize-winter wheat rotation system in high- and medium-yield areas

地点 Site	处理 Treatment	夏玉米 Summer maize		冬小麦 Winter wheat		
		穗粒数 Grains per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	穗数 Pike number ( $10^6 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	穗粒数 Grain per spike	千粒重 1000-grain weight (g)
		高产区 High-yield area	T1	542.1b	320.4a	4.6c
	T2	569.1ab	319.0a	5.3bc	49.6b	48.0a
	T3	572.7a	318.3a	5.4ab	50.6ab	46.4a
	T4	578.1a	321.1a	5.5ab	51.1ab	46.6a
	T5	586.3a	319.9a	6.0a	52.9a	45.7a
中产区 Medium-yield area	T1	413.7b	267.6b	4.3b	38.2b	51.3a
	T2	442.7a	301.3a	5.0b	43.8a	50.7a
	T3	437.0ab	292.0ab	5.1a	44.1a	49.7a
	T4	446.0a	291.8ab	5.2a	45.4a	50.5a
	T5	460.0a	295.4ab	5.4a	47.7a	49.1a
ANOVA						
地点 Site (S)		***	*	**	***	**
处理 Treatment (T)		**	NS	***	***	NS
S × T		NS	NS	NS	NS	NS

各处理具体介绍见表 2。同列数据后不同小写字母表示同一地点不同处理间在 0.05 水平上差异显著。NS、\*、\*\*和\*\*\*分别表示试验地点、处理及其交互作用不显著、在 0.05、0.01 和 0.001 水平上显著。Detailed information of treatments is shown in Table 2. Values followed by different lowercase letters in the same column of the same site are significantly different ( $P < 0.05$ ). NS, \*, \*\* and \*\*\* represent not significant effect, significant effect at 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively, of experimental sites, treatments and theirs interactions.

SPAD 值时空变化特异性。结果表明, 不同氮肥调控模式间, 2016—2017 年夏玉米与冬小麦叶片 SPAD 值于各生育期均整体表现为  $T1 < T2 < T3 < T4 < T5$ , 变化趋势较为稳定。氮肥调控措施下(T2-T4)高、中产区夏玉米各生育期叶片 SPAD 平均值, 与 T1 对照相比, 增幅分别为 12.7%和 14.3%, 冬小麦则为 6.4%与 7.0%(图 2)。生育期间, 随作物生长, 夏玉米叶片 SPAD 值整体表现为下降趋势, 主要原因是夏玉米生育期较短, 短期内植株生物量迅速增加, 稀释效应显著; 冬小麦叶片 SPAD 值各生育期间则无明显差异, 可能是由于叶片 SPAD 值测试范围较小(约  $6 \text{ mm}^2$ ), 且小麦生育期较长, 叶片在小尺度范围内稀释效应不甚剧烈, 加之 SPAD 值测试受诸多因素影响, 如叶片厚度、叶色、叶表面绒毛等, 因此不同生育期测试间未表现出较为明显的差异性(图 2)。

### 2.3 氮肥施用模式对玉-麦周年轮作系统作物氮含量影响分析

生育期间, 随播种后天数增加, 无论夏玉米或冬小麦, 其地上部植株氮含量(plant nitrogen con-

centration, PNC,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )均表现为逐步降低趋势, 这与冬小麦叶片 SPAD 值表现效果略有差异。各氮肥施用模式间, 与叶片 SPAD 值变化趋势相一致, 玉-麦周年轮作下夏玉米和冬小麦 PNC 在各处理间仍表现为  $T1 < T2 < T3 < T4 < T5$ (图 3)。各生育期平均分析, 与 T1(对照)和 T2(氮肥一次性足量基施)相比, 高产区夏玉米采用 T5 处理施氮模式其 PNC 可分别提高 30.9%和 20.1%, 中产区增幅则分别为 28.1%和 16.2%; 高产区冬小麦相比于 T1 及 T2 处理, T5 处理模式下 PNC 增幅分别为 24.5%和 16.3%, 中产区则分别为 35.1%和 22.7%, 差异均显著。此外, 图 3 中放大图为夏玉米和冬小麦籽粒氮含量(grain nitrogen concentration, GNC,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )处理间变化效果, 其中, 夏玉米于籽粒形成时即分植株和籽粒两部分进行氮含量测试分析, 冬小麦仅分析成熟期时两部位氮含量效果。结果表明, 与 PNC 处理间变化趋势相似, 夏玉米 GNC 仍表现为 T5 最高, T4、T3、T2、T1 顺次降低。如与 T1 相比, 高、中产区夏玉米 T5 处理增幅分别高达 28.0%和 29.9%, 冬小麦则分别为 15.7%

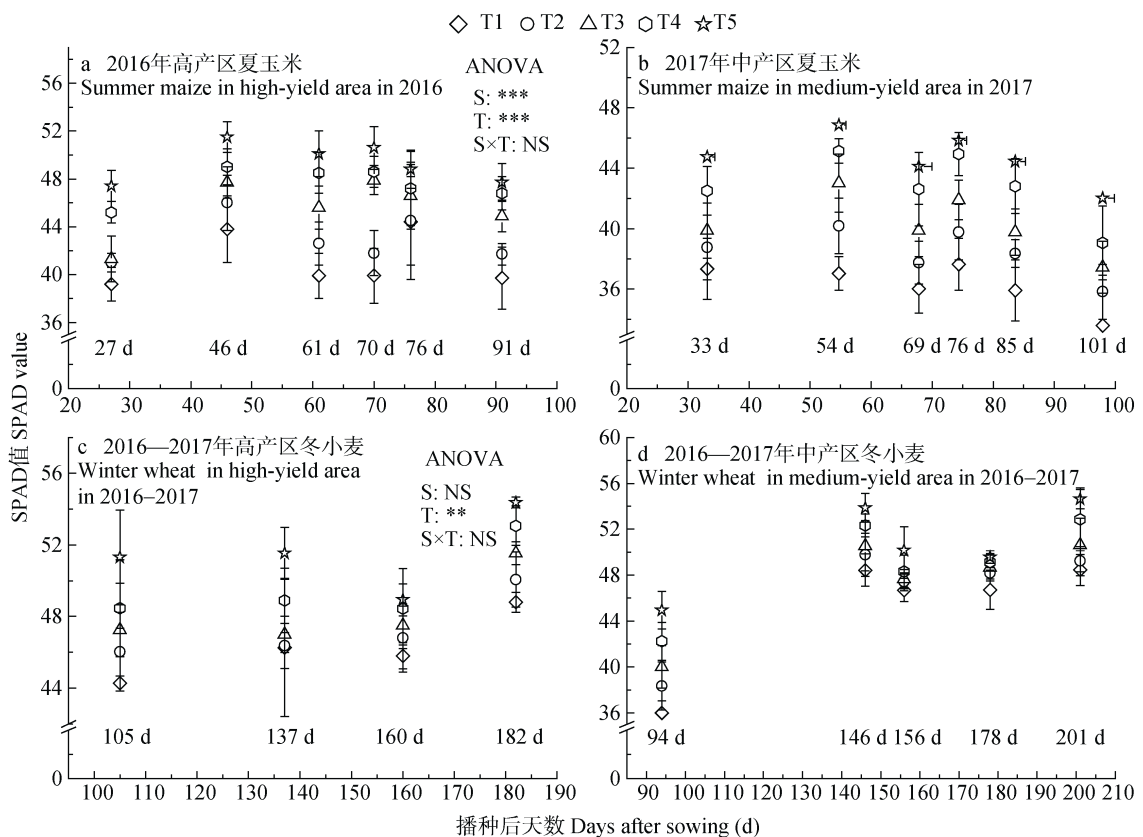


图 2 氮肥施用模式对高产区和中产区夏玉米-冬小麦周年轮作系统各生育期作物叶片 SPAD 值的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen application methods on SPAD values at different growth stages of crops of the summer maize-winter wheat rotation system in high- and medium-yield areas

各处理具体介绍见表 2。NS、\*\*和\*\*\*分别表示试验地点、处理及其交互作用不显著、在 0.01 和 0.001 水平上显著。Detailed information of treatments is shown in Table 2. NS, \*\* and \*\*\* represent not significant effect, significant effect at 0.01 and 0.001 probability levels, respectively, of experimental sites, treatments and their interactions.

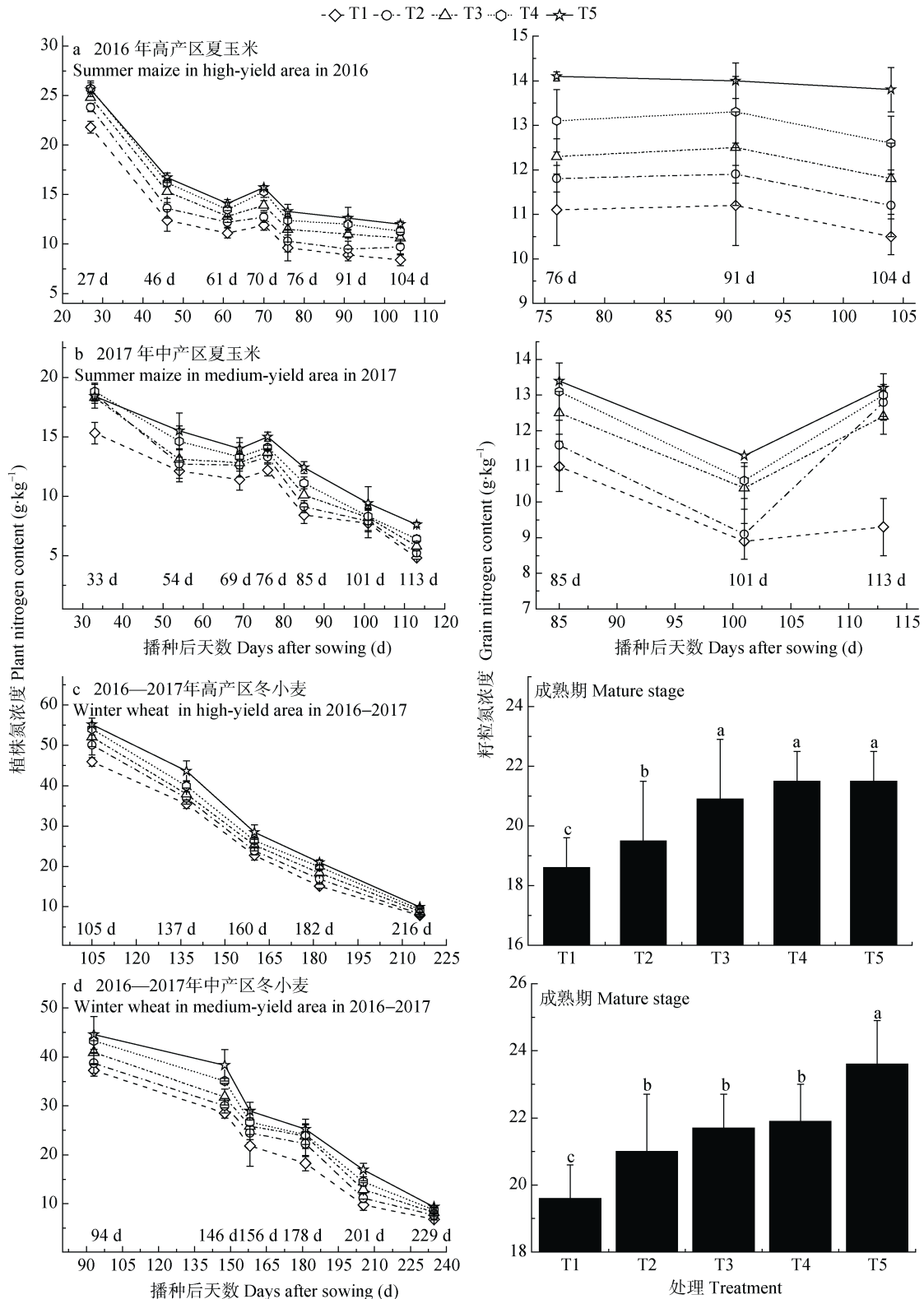


图 3 氮肥施用模式对高产区和中产区夏玉米-冬小麦周年轮作系统作物植株和籽粒氮含量的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen application methods on plant and grain nitrogen contents of crops of the summer maize-winter wheat rotation system in high- and medium-yield areas

各处理具体介绍见表 2。图 3a-d 的右侧图为夏玉米和冬小麦生殖生长期籽粒氮含量。柱图中不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。Detailed information of treatments is shown in Table 2. The right side charts in figure 3a-d show the grain nitrogen contents of summer maize and winter wheat at reproduction stage. In two column figures, different lowercase letters mean significant differences among treatments at  $P < 0.05$ .



和 20.4%。高、中产区, 高产区夏玉米 PNC 和 GNC 平均值分别比中产区提高 19.4%和 7.3%, 冬小麦则分别提高 33.3%和-5.9%。

#### 2.4 氮肥施用模式对玉-麦周年轮作系统作物氮积累量影响分析

由图 4 可知, 随生育进程推进, 各氮肥施用模式高、中产区夏玉米与冬小麦植株氮积累量(plant nitrogen accumulation, PNA,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )均呈先升高后降低趋势。其中, 两产区夏玉米分别至播种后 70 d 和 76 d 达峰值, 冬小麦则分别至 182 d 与 201 d 时最高。产区间, 高产区夏玉米和冬小麦 PNA 均显著优于中产区, 增幅分别高达 47.0%和 85.9%。氮肥施用模式间, 无论高产区亦或中产区, 夏玉米和冬小麦 PNA 均表现为  $T1 < T2 < T3 < T4 < T5$ 。将各生育期 PNA 平均, 与 T1 和 T2 相比, 高产区夏玉米 T5 处理分别提高 89.2%和 61.5%, 中产区增幅则分别为 83.8%和 51.0%; 高产区冬小麦 T5 相比于 T1 及 T2 则分别增加 87.5%和 52.1%, 中产区则分别为 112.4%和 68.9%, 差异均较显著。此外, 两产区夏玉米和冬小麦籽粒氮积累量(grain nitrogen accumulation, GNA,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )于不同氮肥施用模式间差异效应与 PNA 相一致, 不同的是, 高产区夏玉米 GNA 至收获时进入平台期, 中产区则仍表现为升高趋势, 表明该地力条件下籽粒对氮的吸收并未被充分利用, 有待进一步挖掘和提高。

#### 2.5 氮肥施用模式对玉-麦周年轮作系统作物氮肥利用率影响分析

在 2016—2017 年 4 个氮肥施用模式试验中, 高、中产田在氮肥表观利用率(AUN)、氮肥农学效率(AEN)和 100 kg 籽粒需氮量(NAPG)的变化趋势一致, T1-T5 间随处理数增加均呈显著升高趋势, 而氮素收获指数(NHI)则与此相反。其中, 高产区夏玉米和冬小麦 AUN、AEN 和 NAPG 指标均明显优于中产区, 实现了氮营养上的“高吸收高利用”和“高产高效”。与前述指标变化趋势相反, 高产区 NHI 低于中产区(表 4)。交互作用分析表明, 夏玉米和冬小麦, 试验地点(S)对所选用的 4 个氮肥利用率指标均产生了极显著( $P < 0.01$  或  $P < 0.001$ )影响, 处理(T)除冬小麦 NHI 外, 影响效果与 S 相同; 但两者交互作用仅对夏玉米 AUN 和 NAPG 产生影响( $P < 0.01$ ), 其余指标均不显著(表 4)。

### 3 讨论

本文利用氮肥效应田间试验, 系统探究了不同地力水平下氮肥施用模式对玉-麦周年轮作体系

产量及构成因子、氮素吸收与利用效率的影响, 确定了适宜豫北平原玉-麦轮作系统的尿素与缓释氮肥掺混配施的高效施氮管理模式。研究表明, 控释肥与尿素配施是当前作物集约化种植条件下行之有效的施肥措施, 可有效解决作物生长前期因控释肥养分不能有效释放而导致的作物减产问题<sup>[25-26]</sup>。纪洋等<sup>[17]</sup>指出, 采用纯控释肥施用模式和控释肥与尿素配施模式虽然均可显著提高水稻产量, 但后者产量比前者增加 9.1%~26.3%。本试验中, 改进农民习惯施氮措施(普通尿素一次性基施或分次施用), 优化氮肥施用模式(普通尿素与控释尿素配合减施或足量施用)可显著提高玉-麦轮作下成熟期产量, 并大幅提高氮肥利用率, 这表明普通尿素与缓释氮肥配施的优化氮肥管理模式在稳产甚至增产的同时较大幅度提高氮肥利用率是可行的。与此同时, 与常规施氮方法相比, 优化氮肥施用模式还可显著提高玉-麦轮作下各生育期叶片 SPAD 值、植株或籽粒氮含量以及氮素积累量。主要原因是一方面控释尿素比普通尿素养分利用率普遍较高, 肥料养分在土壤中可保持较长时间的高有效性, 并能大幅降低肥料损失, 提高养分利用率<sup>[27]</sup>; 另一方面, 两者配施后更具有多重优点, 如既能满足作物苗期对养分需求, 又能维持中后期养分持续供应<sup>[28-29]</sup>。另有研究表明, 充足的氮肥供应是作物高产、稳产的前提, 科学有效的氮营养管理则是将适宜的氮肥品种与合适的氮肥用量在适宜的时期基施或追施于恰当的位置, 并与最佳作物农艺管理措施相融合, 方能实现作物绿色、高产、高效<sup>[30-31]</sup>。缓释氮肥可控制养分释放速率, 具有肥效期长、养分供养稳定等优势。因此, 尿素掺混缓释氮肥配施的作物氮肥管理模式近年来被认为是一种肥效稳定长久、节本增效潜力较大的一种新型氮肥管理制度<sup>[32-33]</sup>。郭金金等<sup>[34]</sup>系统分析了不同施氮量下尿素与缓释氮肥掺混对大田夏玉米生理特性、氮素吸收及土壤  $\text{NO}_3\text{-N}$  残留的影响, 发现相比于普尿与缓释尿素单施, 两者掺混后施用玉米净光合速率分别提高 6.9%~88.6%和 3.4%~90.3%, 氮素吸收率则分别提高 8.1%~67.3%和 6.2%~54.1%, 差异显著。本课题前期试验结果同样表明<sup>[35]</sup>, 施氮  $156.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (控释尿素 普通尿素=3 1)措施下冬小麦产量、氮肥利用率和农学效率较农民习惯施肥分别提高 6.6%、13.6%和  $2.3 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 这与本研究结论相符合。

此外, 氮肥表观利用率、农学效率、100 kg 籽粒需氮量等均是表征作物氮肥吸收利用效率的常用指标, 从不同侧面反映了作物对氮素营养的吸收、

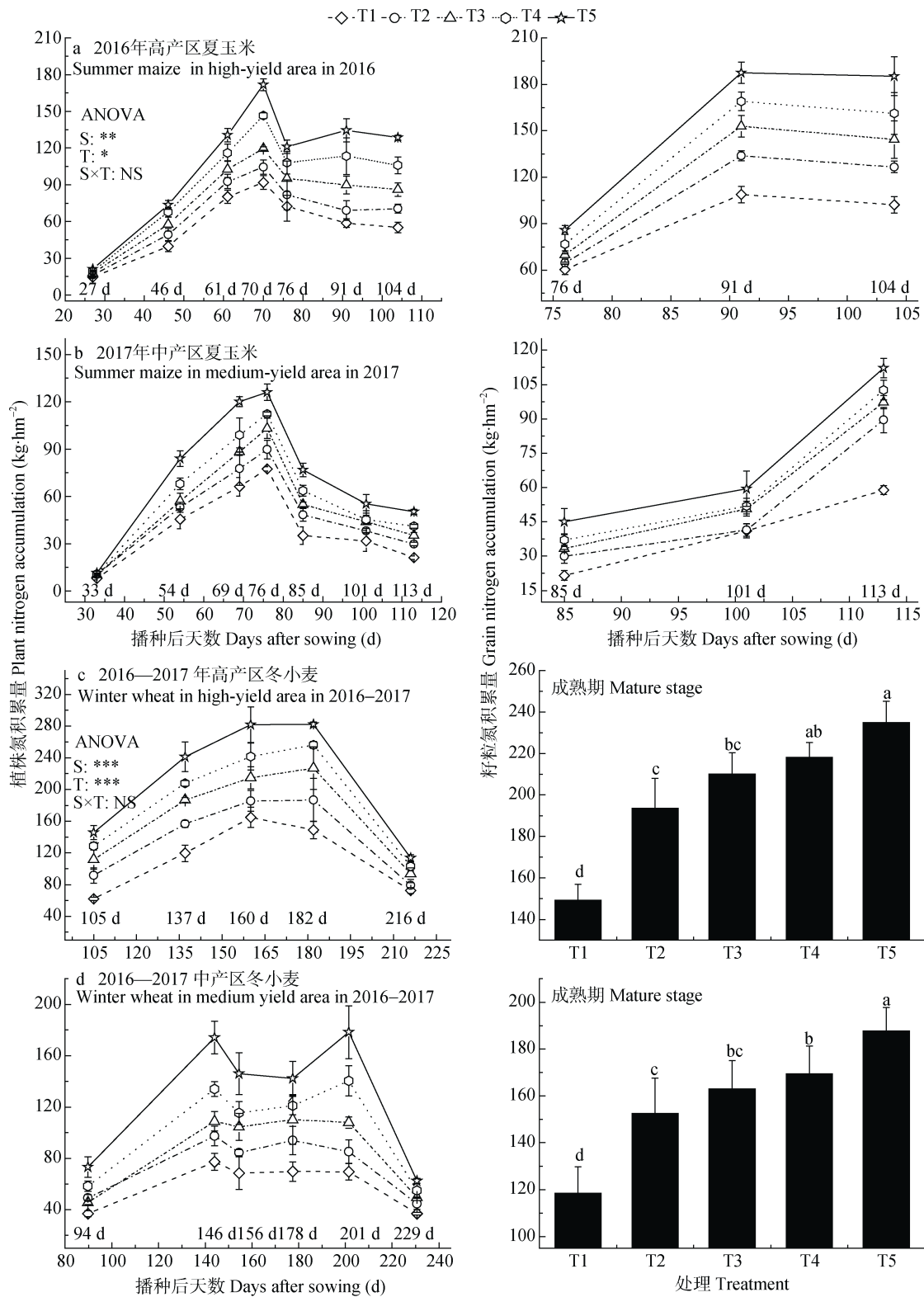


图 4 氮肥施用模式对高产区和中产区夏玉米-冬小麦周年轮作系统各作物植株和籽粒氮积累量的影响

Fig. 4 Effects of nitrogen application methods on plant and grain nitrogen accumulation of crops of the summer maize-winter wheat rotation system in high- and medium-yield areas

各处理具体介绍见表 2。图 4a-d 的右侧图为夏玉米和冬小麦生殖生长期籽粒氮积累量。NS、\*、\*\*和\*\*\*分别表示试验地点、处理及其交互作用不显著、在 0.05、0.01 和 0.001 水平上显著。柱图中不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。Detailed information of treatments is shown in Table 2. The right side charts in figure 4a-d show the grain nitrogen accumulation of summer maize and winter wheat at reproduction stage. In two column figures, different lowercase letters mean significant differences among treatments at  $P < 0.05$ . NS, \*, \*\* and \*\*\* represent not significant effect, significant effect at 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively, of experimental sites, treatments and their interactions.

表 4 氮肥施用模式对高产区和中产区夏玉米-冬小麦周年轮作系统作物氮素利用率的影响  
Table 4 Effects of nitrogen application methods on nitrogen use efficiencies of crops of the summer maize-winter wheat rotation system in high- and medium-yield areas

地点 Site	处理 Treatment	夏玉米 Summer maize				冬小麦 Winter wheat			
		氮肥表观 利用率 Apparent use efficiency of N (%)	氮肥农学效率 Agronomic efficiency of N (kg·kg <sup>-1</sup> )	100 kg 籽粒 需氮量 N amount for producing 100 kg grains (g)	氮素收 获指数 N harvest index	氮肥表观 利用率 Apparent use efficiency of N (%)	氮肥农学效率 Agronomic efficiency of N (kg·kg <sup>-1</sup> )	100 kg 籽粒 需氮量 N amount for producing 100 kg grains (g)	氮素收 获指 数 N harvest index
高产区 High- yield area	T1	—	—	1.61e	0.65c	—	—	2.77c	0.67b
	T2	18.9d	7.3c	1.75d	0.64bc	24.2c	9.1c	2.75c	0.71a
	T3	34.8c	11.9b	1.88c	0.63ab	38.9b	9.7bc	3.02b	0.69ab
	T4	61.0b	16.6a	2.09b	0.60a	55.3a	11.9ab	3.16a	0.68b
	T5	74.5a	17.3a	2.34a	0.59a	60.4a	13.8a	3.20a	0.67b
中产区 Medium- yield area	T1	—	—	1.26c	0.74ab	—	—	2.58d	0.76a
	T2	18.7d	3.1c	1.70b	0.75a	19.7d	5.8c	2.71c	0.78a
	T3	25.1c	7.1b	1.70b	0.73ab	26.9c	7.1bc	2.82bc	0.77a
	T4	35.4b	8.6ab	1.82a	0.71bc	37.8b	8.1ab	2.89bc	0.76a
	T5	39.2a	10.4a	1.90a	0.69c	44.5a	9.1a	3.13a	0.75a

## ANOVA

地点 Site (S)	***	***	***	***	***	***	**	***
处理 Treatment (T)	***	***	***	***	***	**	***	NS
S × T	**	NS	**	NS	NS	NS	NS	NS

各处理具体介绍见表 2。同列数据后不同小写字母表示同一地点不同处理间在 0.05 水平上差异显著。NS、\*\*和\*\*\*分别表示试验地点、处理及其交互作用不显著、在 0.01 和 0.001 水平上显著。Detailed information of treatments is shown in Table 2. Values followed by different lowercase letters in the same column of the same site are significantly different ( $P < 0.05$ ). NS, \*\* and \*\*\* represent not significant effect, significant effect at 0.01 and 0.001 probability levels, respectively, of experimental sites, treatments and their interactions.

同化和利用潜力<sup>[36]</sup>, 在较优化的氮肥管理措施下, 其利用率一般在 50%左右<sup>[37-38]</sup>。本试验中, 高产区夏玉米和冬小麦优化施氮方式(T4 与 T5 处理)氮肥表观利用率为 60%~75%, 中产区也在 40%左右, 而常规施氮方式下其氮肥利用率也在 30%左右, 100 kg 籽粒需氮量结果同样有所偏高。究其原因: 1)本试验各处理小区四周均独立设埂, 埂的高度约 30~40 cm, 降低了氮素径流损失; 2)肥料在施用均采用条施翻土覆盖的方式进行, 避免了肥料直接撒施在土壤表面所造成的挥发损失; 3)本试验区灌溉设施较为先进, 均采用微管喷头喷洒方式进行, 肥料释放较为彻底, 减少了肥料的挥发损失, 促进了作物对氮素的吸收利用效能。

充足的养分供应是作物获得高产的前提, 而土壤养分库容大小则是其养分供应能力的根本保障。因此, 土壤基础肥力高低至关重要<sup>[39-40]</sup>。本文中, 0~20 cm 耕层土壤理化性状显示高产区土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾相比于中产区原阳点分别显著提高 49.4%、53.7%、20.6%、94.7%和 56.9%, 这也是高产区夏玉米和冬小麦产量特征与氮营养指标均明显高于中产区的主要原因。王俊忠等<sup>[41]</sup>试验指出, 高产田夏玉米产量明显优于中产田, 且前者随氮肥用量增加其增产效应显著低于中产田。在增产机制上, 高产田作物叶片硝酸还原酶、

谷氨酰胺合成酶和蔗糖磷酸合成酶活性均明显高于中、低产田, 而上述酶活性则是促使作物氮素同化、物质合成与转运的关键动力<sup>[42-43]</sup>。本试验结果表明, 不同产区间玉-麦轮作体系各项指标均表现为高产区间明显优于中产区, 且不同氮肥施用模式间变化趋势均一致。因此, 根据土壤肥力水平、区域特点和作物目标产量、需肥特性等确定适宜的氮肥施用模式, 有效协调作物高产、资源高效和生态环境保护间的矛盾, 对实现氮肥施用的生态效益、社会效益和经济效益具有重要意义。此外, 随着现代科技进步及新型农业生产发展, 夏玉米和冬小麦轻简化以及机械化施肥技术将逐步得以快速推广与应用。本研究中缓释氮肥与普通尿素配合施用的施肥模式及相应配方, 亦满足于机械化及快捷化施肥的需求。同时, 如能将本试验结果与河南省不同粮食主产区(高、中、低产田)作物产量及地力性状相结合, 研制适合于区域特性玉-麦轮作下作物专用配方肥, 实施种、肥同播, 这对玉米、小麦绿色、高产高效施肥技术创建及普及推广具有重要意义和发展前景。

#### 4 结论

本文选取河南省典型高、中产区田块为试验点, 以玉-麦周年轮作制下作物氮营养特性和高效施氮模式为切入点, 分析不同氮肥施用措施对作物产量、养分吸收利用及转运效率变化规律影响, 结果

表明: 玉-麦周年轮作下不同氮肥施用模式间夏玉米和冬小麦产量均以控释尿素与普通尿素配比氮足量施用最佳(T5), 氮素减量施用次之(T4), 但 T4 与 T5 间产量差异未达显著水平; 常规施氮方式中普通尿素分次施用(T3)和一次基施(T2)产量效果则相对次之, 对照处理最差(T1)。产量构成因子、叶片 SPAD 值、植株和籽粒氮含量、氮素积累量等氮营养指标变化趋势与此相似, 上述结果在不同年份和区域的夏玉米与冬小麦试验结果相一致。表明在作物稳产甚至增产的前提下, 优化氮肥管理模式可有效减少氮肥用量, 并能较大幅度提高氮肥利用效率。此外, 优化氮肥管理模式可有效促进高产区夏玉米花后氮素合成、分配与转运效率, 中产区则主要集中于花前; 冬小麦变化趋势则与此相反。该结果对进一步掌握高、中地力条件下夏玉米与冬小麦各自氮营养吸收与同化特异性, 研制适合不同生态区的作物专用配方肥或缓控释肥提供了重要试验基础和理论参考。

## 参考文献 References

- [1] 王永华, 黄源, 辛明华, 等. 周年氮磷钾配施模式对砂姜黑土麦玉轮作体系籽粒产量和养分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(6): 1031-1046  
WANG Y H, HUANG Y, XIN M H, et al. Effects of the year-round management model of N, P and K combined application on grain yield and nutrient efficiency of wheat-maize rotation system in lime concretion black soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(6): 1031-1046
- [2] HARTMANN T E, YUE S C, SCHULZ R, et al. Yield and N use efficiency of a maize-wheat cropping system as affected by different fertilizer management strategies in a farmer's field of the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2015, 174: 30-39
- [3] MONTEMURRO F, MAIORANA M, FERRI D, et al. Nitrogen indicators, uptake and utilization efficiency in a maize and barley rotation cropped at different levels and sources of N fertilization[J]. Field Crops Research, 2006, 99(2/3): 114-124
- [4] YIN M H, LI Y N, XU Y B. Comparative effects of nitrogen application on growth and nitrogen use in a winter wheat/summer maize rotation system[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(9): 2062-2072
- [5] LI Y, LIU H J, HUANG G H. The effect of nitrogen rates on yields and nitrogen use efficiencies during four years of wheat-maize rotation cropping seasons[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(5): 2076-2088
- [6] Dobermann A. Nutrient use efficiency-measurement and management[M]//KRAUSS A, ISHERWOOD K, HEFFER P. Fertilizer Best Management Practices. Brussels, Belgium: IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices, 2007
- [7] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273  
ZHU Z L, JIN J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259-273
- [8] LADHA J K, PATHAK H, KRUPNIK T J, et al. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects[J]. Advances in Agronomy, 2005, 87: 85-156
- [9] GALLOWAY J N, TOWNSEND A R, ERISMAN J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions[J]. Science, 2008, 320(5878): 889-892
- [10] 侯云鹏, 孔丽丽, 李前, 等. 覆膜滴灌条件下氮肥运筹对玉米氮素吸收利用和土壤无机氮含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1378-1387  
HOU Y P, KONG L L, LI Q, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on nitrogen absorption, utilization and soil inorganic nitrogen content under film mulch drip irrigation of maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(9): 1378-1387
- [11] DAWSON J C, HUGGINS D R, JONES S S. Characterizing nitrogen use efficiency in natural and agricultural ecosystems to improve the performance of cereal crops in low-input and organic agricultural systems[J]. Field Crops Research, 2008, 107(2): 89-101
- [12] 杨峰, 闫秋艳, 鲁晋秀, 等. 氮肥运筹对夏玉米产量、氮素利用率及土壤养分残留量的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(1): 171-178  
YANG F, YAN Q Y, LU J X, et al. Effects of nitrogen application on summer maize yield, nutrient utilization efficiency and soil available nutrient residues[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, 32(1): 171-178
- [13] YANG Y C, ZHANG M, LI Y C, et al. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, activities of leaf enzymes, and rice yield[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(6): 2307-2317
- [14] JAROSIEWICZ A, TOMASZEWSKA M. Controlled-release NPK fertilizer encapsulated by polymeric membranes[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(2): 413-417
- [15] PATIL M D, DAS B S, BARAK E, et al. Performance of polymer-coated urea in transplanted rice: Effect of mixing ratio and water input on nitrogen use efficiency[J]. Paddy and Water Environment, 2010, 8(2): 189-198
- [16] AKIYAMA H, YAN X Y, YAGI K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N<sub>2</sub>O and NO emissions from agricultural soils: Meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2010, 16(6): 1837-1846
- [17] 纪洋, 于海洋, 徐华. 控释肥与尿素配合施用对稻季土壤 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(9): 1494-1500  
JI Y, YU H Y, XU H. Effect of controlled-release fertilizer and its combined application with urea on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions in rice soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(9): 1494-1500
- [18] 冯洋, 陈海飞, 胡孝明, 等. 高、中、低产田水稻适宜施氮量和氮肥利用率的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014,

- 20(1): 7-16  
FENG Y, CHEN H F, HU X M, et al. Optimal nitrogen application rates on rice grain yield and nitrogen use efficiency in high, middle and low-yield paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(1): 7-16
- [19] 韩燕来, 葛东杰, 汪强, 等. 施氮量对豫北潮土区不同肥力麦田氮肥去向及小麦产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(5): 151-154  
HAN Y L, GE D J, WANG Q, et al. Effect of N fertilizer rate on fate of labeled nitrogen and winter wheat yield on different soil fertility fields in Chao soil area in north Henan[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(5): 151-154
- [20] 宋艳华, 罗丽丽, 王国强. 河南省高中低产田区农用地产能影响因素评价研究[J]. *地域研究与开发*, 2010, 29(6): 124-128  
SONG Y H, LUO L L, WANG G Q. Influence factors assessment research on agricultural land realizable throughput of high, medium and low yield region in Henan Province[J]. *Areal Research and Development*, 2010, 29(6): 124-128
- [21] 刘景辉, 王志敏, 李立军, 等. 超高产是中国未来粮食安全的基本技术途径[J]. *农业现代化研究*, 2003, 24(3): 161-165  
LIU J H, WANG Z M, LI L J, et al. Higher-yield is key technical method of maintaining future food security in China[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2003, 24(3): 161-165
- [22] 张琳, 张凤荣, 姜广辉, 等. 我国中低产田改造的粮食增产潜力与食物安全保障[J]. *农业现代化研究*, 2005, 26(1): 22-25  
ZHANG L, ZHANG F R, JIANG G H, et al. Potential improvement of medium-low yielded farmland and guarantee of food safety in China[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2005, 26(1): 22-25
- [23] 黄明, 王朝辉, 罗来超, 等. 垄覆沟播及施肥位置优化对旱地小麦氮磷钾吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1158-1168  
HUANG M, WANG Z H, LUO L C, et al. Effects of ridge mulching, furrow seeding, and optimized fertilizer placement on NPK uptake and utilization in dryland wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5): 1158-1168
- [24] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 等. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 95-104  
LU Y H, NIE J, LIAO Y L, et al. Effects of urease and nitrification inhibitor on yield, nitrogen efficiency and soil nitrogen balance under double-rice cropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 95-104
- [25] SHOJI S, DELGADO J, MOSIER A, et al. Use of controlled release fertilizers and nitrification inhibitors to increase nitrogen use efficiency and to conserve air and water quality[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32(7/8): 1051-1070
- [26] JI Y, LIU G, MA J, et al. Effect of controlled-release fertilizer on nitrous oxide emission from a winter wheat field[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94(1): 111-122
- [27] AZEEM B, KUSHAARI K, MAN Z B, et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer[J]. *Journal of Controlled Release*, 2014, 181: 11-21
- [28] NAZ M Y, SULAIMAN S A. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: A review[J]. *Journal of Controlled Release*, 2016, 225: 109-120
- [29] 张木, 唐拴虎, 黄巧义, 等. 缓释尿素配施普通尿素对双季稻养分的供应特征[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3985-3995  
ZHANG M, TANG S H, HUANG Q Y, et al. The nutrient supply characteristics of co-application of slow-release urea and common urea in double-cropping rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3985-3995
- [30] BRUULSEMA T W, WITT C, GARCIA F, et al. Global framework for fertilizer BMPs[J]. *Better Crops*, 2008, 92(2): 13-15
- [31] 王宜伦, 白由路, 谭金芳, 等. 采用粒片状肥料实现夏玉米一次施肥的可行性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(4): 1126-1132  
WANG Y L, BAI Y L, TAN J F, et al. Availability study of once quantitative fertilization in summer maize using fertilizer tablets[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(4): 1126-1132
- [32] ZHENG W K, ZHANG M, LIU Z G, et al. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2016, 197: 52-62
- [33] 李伟, 李絮花, 李海燕, 等. 控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响[J]. *作物学报*, 2012, 38(4): 699-706  
LI W, LI X H, LI H Y, et al. Effects of different mixing rates of controlled-release urea and common urea on grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4): 699-706
- [34] 郭金金, 张富仓, 闫世程, 等. 缓释氮肥与尿素掺混对玉米生理特性和氮素吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1194-1204  
GUO J J, ZHANG F C, YAN S C, et al. Effects of blending of slow-release nitrogen fertilizer and urea on maize physiological characteristics and nitrogen uptake[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5): 1194-1204
- [35] 常凤, 王海标, 陶静静, 等. 减氮配施控释尿素对冬小麦产量及氮肥效率的影响[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(25): 1-6  
CHANG F, WANG H B, TAO J J, et al. Combined application of controlled-release urea and conventional urea under reduced N rate affect yield and N utilization efficiency of winter wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(25): 1-6
- [36] NOVOA R, LOOMIS R S. Nitrogen and plant production[J]. *Plant and Soil*, 1981, 58(1/3): 177-204
- [37] MIKKELSEN D S, JAYAWEERA G R, ROLSTON D E. Nitrogen fertilization practices of lowland rice culture[M]// BACON P E. *Nitrogen Fertilization in the Environment*. New York, USA: Marcel Dekker, Inc., 1995: 171-223
- [38] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(12): 1456-1461

- LIU L J, SANG D Z, LIU C L, et al. Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(12): 1456–1461
- [39] GHOLIZADEH A, SABERIOON M, BORŮVKA L, et al. Leaf chlorophyll and nitrogen dynamics and their relationship to lowland rice yield for site-specific paddy management[J]. *Information Processing in Agriculture*, 2017, 4(4): 259–268
- [40] BASSO B, SHUAI G Y, ZHANG J S, et al. Yield stability analysis reveals sources of large-scale nitrogen loss from the US Midwest[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 5774
- [41] 王俊忠, 黄高宝, 张超男, 等. 施氮量对不同肥力水平下夏玉米碳氮代谢及氮素利用率的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 2045–2052
- WANG J Z, HUANG G B, ZHANG C N, et al. Influence of nitrogen fertilizer rate on carbon nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency of summer maize under high and medium yield levels[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2045–2052
- [42] GONZÁLEZ-MORO B, MENA-PETITE A, LACUESTA M, et al. Glutamine synthetase from mesophyll and bundle sheath maize cells: Isoenzyme complements and different sensitivities to phosphinothricin[J]. *Plant Cell Reports*, 2000, 19(11): 1127–1134
- [43] 吕英民, 张大鹏. 果实发育过程中糖的积累[J]. *植物生理学通讯*, 2000, 36(3): 258–265
- LYU Y M, ZHANG D P. Accumulation of sugars in developing fruits[J]. *Plant Physiology Communications*, 2000, 36(3): 258–265

## 欢迎订阅 2020 年《中国生态农业学报(中英文)》

《中国生态农业学报(中英文)》原名《中国生态农业学报》，由中国科学院遗传与发育生物学研究所和中国生态经济学会主办，中国科学院主管，科学出版社出版。系中文核心期刊、中国科技精品期刊、百种中国杰出学术期刊、中国权威学术期刊，为中国学术期刊综合评价数据库、中国期刊全文数据库、中国学术期刊文摘、中国科学引文数据库、中国科技论文与引文数据库、CNKI 中国期刊全文数据库源刊，并被国际农业生物学文摘(CABI)、美国化学文摘(CA)、哥白尼索引(IC)、美国乌利希国际期刊指南、SCOPUS 等国际数据库及检索单位收录。

《中国生态农业学报(中英文)》报道农业生态学、农业生态经济学及生态农业和农业生态工程等领域的创新性研究成果。内容划分为农业生态系统及其调控、作物栽培与生理生态、农业资源与环境、农业生态经济与生态农业 4 个栏目。

据《中国科技期刊引证报告》(核心版) 2018 年影响因子为 1.613，学科排名第 2。据 CNKI《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术)-2018 版》期刊复合影响因子为 2.680，期刊综合影响因子为 1.775。

在 2018 年中国科学文献计量评价研究中心发布的《世界学术期刊学术影响力指数(WAJCI)年报》中，我刊 WAJCI 指数为 2.867，在世界农业科学综合类期刊中排名 13，入选 Q1 区。

《中国生态农业学报(中英文)》国内外公开发行人，2020 年起每期定价 70 元，全年 840 元。邮发代号：82-973，全国各地邮局均可订阅。漏订者可直接汇款至编辑部补订。

地址：(050022) 河北省石家庄市槐中路 286 号《中国生态农业学报(中英文)》编辑部

电话：(0311) 85818007；网址：<http://www.ecoagri.ac.cn>；E-mail: [editor@sjziam.ac.cn](mailto:editor@sjziam.ac.cn)



公众微信号：zgstnyxb

