

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200189

王丹丹, 李岚涛, 韩本高, 张倩, 苗玉红, 王宜伦. 养分专家系统推荐施肥对冬小麦产量、养分转运及肥料利用的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(11): 1692–1702

WANG D D, LI L T, HAN B G, ZHANG Q, MIAO Y H, WANG Y L. Effects of Nutrient Expert recommended fertilization on winter wheat yield, nutrient accumulation, transportation, and utilization[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(11): 1692–1702

## 养分专家系统推荐施肥对冬小麦产量、养分 转运及肥料利用的影响\*

王丹丹, 李岚涛, 韩本高, 张倩, 苗玉红, 王宜伦\*\*

(河南农业大学资源与环境学院 郑州 450002)

**摘要:** 为探究冬小麦科学施肥技术, 明确养分专家系统推荐施肥对冬小麦产量、养分积累转运与利用的影响, 于 2018—2019 年分别在河南省鹤壁市和新乡市以冬小麦(鹤壁、新乡试验品种分别为‘郑麦 7698’和‘郑麦 366’)为试验材料, 设置 7 个处理[农民习惯施肥(FP)、当地推荐施肥(ST)、养分专家系统推荐施肥(NE)、在 NE 基础上配施缓控释氮肥(RNE)、在 NE 基础上不施氮肥(NE-N)、在 NE 基础上不施磷肥(NE-P)、在 NE 基础上不施钾肥(NE-K)], 探究不同施肥处理对冬小麦氮、磷、钾养分转运分配规律和肥料利用效率的影响。结果表明, 冬小麦氮、磷、钾施肥量 NE 较 FP 处理分别降低 16.2%、43.3%、-13.2%(鹤壁)和 19.5%、48.0%、-57.9%(新乡); 冬小麦产量 NE 与 FP 处理无显著性差异, RNE 与 FP 处理存在显著性差异; NE、RNE 较 FP 处理分别增产 4.7%~6.6%、5.5%~9.6%( $P<0.05$ )。进一步研究表明, NE、RNE 处理可显著增加地上部植株养分含量和积累量( $P<0.05$ ), 其花后干物质积累量较 FP 处理增加 9.2%~14.0%、11.9%~18.6%; 花前氮、磷素转运量和钾素转运对籽粒钾素积累贡献率均有提高, 基于养分专家系统推荐施肥的氮、磷、钾肥平均利用效率分别为 42.1%、19.2%、46.6%, 平均农学效率分别为  $11.5 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $13.2 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $13.3 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。综上可知, 小麦养分专家系统指导优化了氮、磷、钾肥的施用量和施用方法, 促进了小麦对氮、磷、钾养分的吸收利用, 提高了肥料利用率, 具有良好的增产效果, 可以在河南地区推广应用。

**关键词:** 养分专家系统; 冬小麦; 产量; 养分转运与积累; 肥料利用率

中图分类号: S143; S512

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



## Effects of Nutrient Expert recommended fertilization on winter wheat yield, nutrient accumulation, transportation, and utilization\*

WANG Dandan, LI Lantao, HAN Bengao, ZHANG Qian, MIAO Yuhong, WANG Yilun\*\*

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

**Abstract:** The overuse of fertilizer, unreasonable fertilization rates, and low fertilizer use efficiency affect modern agricultural systems, limiting farmers' income and development of sustainable agriculture in Henan Province, China. This study investigated the effect of the Nutrient Expert system on winter wheat yield, nutrient accumulation, transportation, and fertilizer utilization efficiency.

\* 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFD0301106)资助

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

王丹丹, 从事作物营养与高效施肥技术研究。E-mail: 18437958711@163.com

收稿日期: 2020-03-13 接受日期: 2020-07-15

\* This work was funded by the National Key Research and Development Project of China (2017YFD0301106).

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

Received Mar. 13, 2020; accepted Jul. 15, 2020

Field experiments were conducted during the 2018–2019 growing season in Hebi and Xinxiang, Henan Province, with seven treatments: farmer conventional fertilization (FP), local official recommended fertilization (ST), Nutrient Expert recommended fertilization (NE), Nutrient Expert recommended fertilization with controlled-release N fertilizer (RNE), and the elimination of N, P, or K input in the NE treatment (NE-N, NE-P, and NE-K, respectively). Compared to the FP treatment, N, P, and K fertilizer rates in the NE treatment decreased by 16.2%, 43.3%, and –13.2% in Hebi and 19.5%, 48.0%, –57.9% in Xinxiang, respectively. The yields of the NE and RNE treatments were higher than those of FP by 4.7%–6.6% and 5.5%–9.6%, respectively; NE and FP did not differ significantly on yield, but the RNE yield was significantly higher than that of FP. Compared to the other treatments, NE and RNE also improved plant nutrition concentrations and accumulation during the growing season. The dry matter accumulation after anthesis in NE and RNE was significantly higher than that in FP (by 9.2%–14.0% and 11.9%–18.6%, respectively), and the contribution of N, P, and K remobilization to the grains before anthesis also increased significantly. The average fertilizer use efficiency of N, P, and K was 42.1%, 19.2%, and 46.6%, respectively, and the average agronomic efficiency was 11.5 kg·kg<sup>-1</sup>, 13.2 kg·kg<sup>-1</sup>, and 13.3 kg·kg<sup>-1</sup>, respectively, based on the Nutrient Expert system of winter wheat. In general, the Nutrient Expert recommended fertilization optimized the fertilizer management, promoted the absorption and utilization of N, P, and K, and improved the winter wheat yield and fertilizer utilization efficiency. Therefore, we encourage the use of the Nutrient Expert system for fertilizer management in the winter wheat fields of Henan Province, China.

**Keywords:** Nutrient Expert system; Winter wheat; Yield; Nutrient transfer and accumulation; Fertilizer utilization rate

小麦(*Triticum aestivum*)是我国重要的粮食作物之一, 平均每年种植面积 2 400 万 hm<sup>2</sup> 以上, 其产业健康发展直接关系到国家粮食安全和农业可持续发展<sup>[1-2]</sup>。在小麦种植诸多管理措施中, 绿色、高效施肥是其中重要的一环。然而, 当前小麦生产中施肥不合理问题十分突出, 如氮肥施用过量、磷钾肥投入偏少、施肥时期与肥料配比不合理等, 在肥料产投比降低的同时易引发一系列环境问题<sup>[3-4]</sup>。为顺应国家减肥增效的发展战略, 优化施肥方式和提高肥料利用率对增强小麦产量与品质效应以及实现可持续生产具有重要意义。

王宜伦等<sup>[5]</sup>通过两地田间试验对小麦施肥效应进行研究, 指出优化氮磷钾肥配施可显著促进冬小麦对氮磷钾养分的吸收利用。对河北省多点连续 4 年的冬小麦试验中进一步表明, 合理施肥可提高养分利用率<sup>[6]</sup>。同样的结论在玉米(*Zea mays*)<sup>[7]</sup>、水稻(*Oryza sativa*)<sup>[8]</sup>等粮食作物以及山药(*Dioscorea oppositifolia*)<sup>[9]</sup>、马铃薯(*Solanum tuberosum*)<sup>[10]</sup>和大葱(*Allium fistulosum* var. *gigantum*)<sup>[11]</sup>等经济作物上同样得以印证和拓展, 再次表明合理施肥的重要性。研究表明, 平衡施肥不仅能够稳产增收, 还可有效降低环境污染风险<sup>[12-14]</sup>。截至目前, 在作物诸多平衡施肥技术中, 根据作物生长发育和产量特性来判定作物营养丰缺状况继而确定合理、高效施肥策略的养分专家系统推荐施肥(Nutrient Expert, 简称 NE)是目前应用最广、技术较为成熟的一种<sup>[5,7]</sup>。该方法原理是基于产量反应和农学效率进行推荐施肥<sup>[15-18]</sup>, 满足了当前推荐施肥需求, 得到快速发展并广泛应用, 是一种定点适应小农户生产管理方式

的推荐施肥和养分管理方法。Chuan 等<sup>[19]</sup>已从不同角度对 NE 系统的实用性和普适性进行探究, 认为基于 NE 的推荐施肥策略可有效避免施肥过量或不足等问题。Xu 等<sup>[18]</sup>试验表明, 基于养分专家系统推荐施肥较农民习惯施肥在增产的同时还大幅度提高了东北春玉米养分利用效率。Zhang 等<sup>[20-22]</sup>在对萝卜(*Raphanus sativus*)、小麦和玉米分析后建立了养分管理专家系统, 并通过田间试验验证了 NE 系统使作物产量、品质、盈利能力和养分利用效率显著提高。因此, 基于 NE 推荐施肥下的作物既可做到减肥不减产, 实现节肥增效, 同时能显著降低土壤养分盈余<sup>[14,23]</sup>。

前人基于 NE 系统的冬小麦平衡和优化施肥报道已相对较多, 并从产量效应、经济效益和模型稳定性等角度做了大量的工作, 取得了良好进展<sup>[5,7,10,18-22]</sup>。然而, 在基于 NE 系统明确小麦氮磷钾最佳施肥量的基础上, 进一步研究冬小麦全生育期氮磷钾营养时序变化效应、花前/后干物质和氮磷钾营养积累与转运特性, 并明确肥料利用率的报道则相对较少。因此, 本文通过冬小麦开展了不同施肥处理, 研究氮磷钾不同配施对冬小麦产量和全生育期植株氮磷钾时序变化的影响, 分析了冬小麦花前/花后干物质和氮磷钾养分积累和转运及肥料利用率指标变化, 以期冬小麦养分专家系统推荐施肥指导生产提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区域概况

试验于 2018 年 10 月至 2019 年 6 月在河南省鹤壁市农业科学院科研基地(114°17'E, 35°40'N)和新

乡市原阳县河南农业大学试验基地(113°56'E, 35°6'N)同步进行。供试土壤类型鹤壁为黏质潮土, 原阳为砂质潮土, 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 °C 和 650 mm 左右。0~20 cm 耕层土壤基础化学性质见表 1。

## 1.2 试验设计

试验共设 7 个处理, 分别为: 基于养分专家系统推荐施肥(Nutrient Expert, NE, 中国农业科学院何

萍研究员发布的安卓移动终端“手机和平板”网络版本)、在 NE 基础上不施氮肥(NE-N)、在 NE 基础上不施磷肥(NE-P)、在 NE 基础上不施钾肥(NE-K)、NE 中的氮肥为缓控释肥(RNE, 50%包膜尿素、施肥量同 NE)、当地农技部门推荐施肥(ST)和当地农民习惯施肥(FP)。各处理具体施肥信息如表 2 所示。每个处理 3 次重复, 小区面积为 57.6 m<sup>2</sup>(宽×长=7.2 m×8.0 m), 随机区组排列。

表 1 试验地土壤基本化学性质  
Table 1 Chemical properties of the tested soils in the experimental sites

| 地点<br>Site  | pH  | 有机质<br>Organic matter<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全氮<br>Total N<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 碱解氮<br>Available N<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 有效磷<br>Available P<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾<br>Available K<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
|-------------|-----|------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 鹤壁 Hebi     | 7.2 | 24.9                                           | 1.6                                    | 90.1                                         | 18.8                                         | 138.2                                        |
| 新乡 Xinxiang | 7.6 | 19.9                                           | 1.2                                    | 74.8                                         | 17.2                                         | 85.1                                         |

表 2 不同施肥处理的冬小麦施肥量  
Table 2 Fertilizer application rates of different treatments of winter wheat kg·hm<sup>-2</sup>

| 处理<br>Treatment |                                                                                                    | 鹤壁 Hebi |                               |                  | 新乡 Xinxiang |                               |                  |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------------------|------------------|-------------|-------------------------------|------------------|
|                 |                                                                                                    | N       | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | N           | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O |
| FP              | 当地农民习惯施肥 Farmer conventional practice                                                              | 222     | 150                           | 53               | 231         | 150                           | 38               |
| ST              | 当地农技部门推荐施肥 Local official recommended fertilization                                                | 240     | 105                           | 90               | 210         | 96                            | 60               |
| NE              | 养分专家系统推荐施肥 Nutrient Expert recommend fertilization                                                 | 186     | 85                            | 60               | 186         | 78                            | 60               |
| RNE             | 养分专家系统推荐施肥中氮肥为缓控释肥<br>Nutrient Expert recommend fertilization with controlled-release N fertilizer | 186     | 85                            | 60               | 186         | 78                            | 60               |
| NE-N            | NE 基础上不施氮肥 Nutrient Expert recommend fertilization eliminating N                                   | 0       | 85                            | 60               | 0           | 78                            | 60               |
| NE-P            | NE 基础上不施磷肥 Nutrient Expert recommend fertilization eliminating P                                   | 186     | 0                             | 60               | 186         | 0                             | 60               |
| NE-K            | NE 基础上不施钾肥 Nutrient Expert recommend fertilization eliminating K                                   | 186     | 85                            | 0                | 186         | 78                            | 0                |

供试肥料分别为普通尿素(N 46.0%)、包膜尿素(N 43.2%)、磷酸二铵(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=15%-42%-0)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12.0%)和氯化钾(K<sub>2</sub>O 60.0%)。此外, 农民习惯施肥采用复混肥料(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=18%-20%-7%, 鹤壁)和(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=17%-20%-5%, 新乡)的复合肥料。磷、钾肥在播种前作为基肥一次性施入; 氮肥: RNE 处理播种前一次性施入, 其他处理播种前施 1/2, 拔节前期施 1/2。供试冬小麦品种为‘郑麦 7698’(鹤壁)和‘郑麦 366’(新乡)。播种量为 150 kg·hm<sup>-2</sup>, 田间管理按当地农民种植习惯进行。

## 1.3 测定项目与方法

### 1.3.1 土样采集与分析

在冬小麦播种施肥前采集试验地 0~20 cm 土壤样品, 风干后过筛, 分别测定土壤 pH(水土比 2.5:1, 电极法)、有机质(K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 容量, 外加加热法)、碱解氮(碱解扩散法)、有效磷(NaHCO<sub>3</sub> 浸提, 钼蓝比色法)和速效钾(NH<sub>4</sub>OAC 浸提, 火焰光度计法)含量<sup>[24]</sup>。

### 1.3.2 植株样品采集与分析

试验于 2018 年 10 月播种, 2019 年 6 月收获。分别于冬小麦分蘖期、拔节期、开花期和成熟期(鹤壁点为冬小麦播种后 54 d、165 d、210 d 和 224 d, 新乡点分别为 63 d、162 d、219 d 和 235 d), 在各小区选取代表性 1 m 双行小麦样方(取样方中小麦全部植株)。在 105 °C 杀青 30 min, 然后在 65 °C 烘干至恒重, 用天平称重, 计算生物量。将烘干样品均匀混合粉碎, 采用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮制备待测液, AA3 流动注射分析仪测定植株和籽粒全氮含量, 钼黄比色法测定植株和籽粒全磷含量, 火焰光度计法测定植株和籽粒全钾含量<sup>[24]</sup>。冬小麦成熟后, 在各小区选取长势均匀的小麦样方 1.0 m<sup>2</sup>(宽×长=1.0 m×1.0 m), 取样方内小麦全部穗粒, 自然风干后于实验室内考种分析, 以含水量 13.0% 计算小麦产量。

### 1.4 数据处理与分析

按照隋鹏祥等<sup>[25]</sup>和宋蝶等<sup>[26]</sup>的方法分别计算冬

小麦养分相关指标, 具体如下:

养分积累量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )=植株干物质 $\times$ 植株养分含量 (1)

肥料利用率(%)=(施肥区养分积累量-无肥区养分积累量)/施肥量 $\times 100\%$  (2)

肥料农学效率( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )=(施肥区作物产量-无肥区作物产量)/施肥量 (3)

开花期干物质或养分转运量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )=开花期营养器官干物质或养分积累量-成熟期营养器官干物质或养分积累量 (4)

开花期干物质或养分转运率(%)=开花期干物质或养分转运量/开花期营养器官干物质或养分积累量 $\times 100\%$  (5)

花前营养器官干物质或养分转运对籽粒干物质或养分积累贡献率(%)=开花期干物质或养分转运量/籽粒干物质或养分积累量 $\times 100\%$  (6)

花后干物质或养分积累量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )=成熟期干物质或养分积累量-开花期干物质或养分积累量 (7)

花后干物质或养分积累对籽粒干物质或养分积累贡献率(%)=100-花前积累干物质或养分转运对籽粒干物质或养分积累贡献率 (8)

干物质或养分收获指数=籽粒干物质或养分积累量/成熟期地上部干物质或养分积累量 (9)

采用 Microsoft Excel 2016 进行基础数据输入与前期处理; SPSS 20.0 软件进行试验点与施肥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 养分专家系统推荐施肥对冬小麦产量及其构成因子的影响

优化施肥可显著提高冬小麦产量(表 3)。两试验地产量均以 RNE 处理最高, NE 处理次之, FP 处理最低。与 FP 处理相比, 鹤壁和新乡点 RNE 处理产量增幅分别为 5.5%和 9.6%, NE 处理分别为 4.7%和 6.6%(鹤壁点 RNE 处理达显著水平, 其余处理未达显著水平), 基于专家系统的推荐施肥(NE、RNE)与 ST 处理无显著性差异。肥料减施处理两地冬小麦产量均以 NE-N 处理最低, NE-K 处理最高, 且后者较前者分别提高 9.8%(鹤壁)和 29.0%(新乡)。各处理间穗粒数和穗数变化趋势与产量一致, 千粒重则无显著差异。交互分析结果表明, 试验地点对冬小麦穗粒数和

表 3 不同施肥处理对冬小麦产量及其构成因子的影响  
Table 3 Effects of different fertilization treatments on winter wheat yield and its components

| 地点<br>Site       | 处理<br>Treatment | 穗粒数<br>Grain per spike | 千粒重<br>1000-grain weight (g) | 穗数<br>Spike number ( $\times 10^6\cdot\text{hm}^{-2}$ ) | 产量<br>Yield ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) |
|------------------|-----------------|------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 鹤壁<br>Hebi       | NE-N            | 33.7 $\pm$ 2.1d        | 45.7 $\pm$ 0.7a              | 7.3 $\pm$ 0.6c                                          | 8 150.0 $\pm$ 477.0e                           |
|                  | NE-P            | 35.7 $\pm$ 0.5cd       | 44.1 $\pm$ 1.0b              | 7.5 $\pm$ 0.6bc                                         | 8 616.7 $\pm$ 189.3d                           |
|                  | NE-K            | 36.3 $\pm$ 3.2bcd      | 44.5 $\pm$ 0.9ab             | 7.7 $\pm$ 0.2abc                                        | 8 950.0 $\pm$ 132.3cd                          |
|                  | FP              | 37.8 $\pm$ 2.4abc      | 44.9 $\pm$ 0.9ab             | 7.9 $\pm$ 0.2abc                                        | 9 316.7 $\pm$ 104.1bc                          |
|                  | ST              | 38.6 $\pm$ 0.7abc      | 44.7 $\pm$ 0.8ab             | 8.1 $\pm$ 0.4abc                                        | 9 683.3 $\pm$ 256.6ab                          |
|                  | NE              | 39.4 $\pm$ 0.4ab       | 44.5 $\pm$ 0.3ab             | 8.2 $\pm$ 0.5ab                                         | 9 750.0 $\pm$ 200.0ab                          |
| 新乡<br>Xinxiang   | RNE             | 40.2 $\pm$ 1.0a        | 44.6 $\pm$ 0.9ab             | 8.3 $\pm$ 0.6a                                          | 9 833.3 $\pm$ 58.0 a                           |
|                  | NE-N            | 33.6 $\pm$ 1.7c        | 42.5 $\pm$ 1.3a              | 4.8 $\pm$ 0.5c                                          | 4 650.0 $\pm$ 360.6c                           |
|                  | NE-P            | 34.7 $\pm$ 3.7bc       | 41.4 $\pm$ 0.9a              | 5.5 $\pm$ 0.2c                                          | 5 166.7 $\pm$ 453.7c                           |
|                  | NE-K            | 35.4 $\pm$ 3.4bc       | 41.9 $\pm$ 1.3a              | 6.9 $\pm$ 0.4b                                          | 6 000.0 $\pm$ 132.3b                           |
|                  | FP              | 36.4 $\pm$ 0.5bc       | 40.5 $\pm$ 0.7a              | 7.4 $\pm$ 1.0ab                                         | 6 283.3 $\pm$ 175.6ab                          |
|                  | ST              | 38.2 $\pm$ 0.6ab       | 40.9 $\pm$ 2.0a              | 7.8 $\pm$ 0.3a                                          | 6 400.0 $\pm$ 86.6ab                           |
|                  | NE              | 40.5 $\pm$ 0.9a        | 41.5 $\pm$ 0.8a              | 7.9 $\pm$ 0.2a                                          | 6 700.0 $\pm$ 606.2ab                          |
|                  | RNE             | 42.0 $\pm$ 3.1a        | 40.9 $\pm$ 1.3a              | 8.0 $\pm$ 0.2a                                          | 6 883.3 $\pm$ 539.3a                           |
| ANOVA            |                 |                        |                              |                                                         |                                                |
| 试验地点 Site (S)    |                 | NS                     | ***                          | NS                                                      | ***                                            |
| 处理 Treatment (T) |                 | ***                    | NS                           | ***                                                     | ***                                            |
| S $\times$ T     |                 | NS                     | NS                           | NS                                                      | NS                                             |

各处理详见表 2。同列数据后不同小写字母表示同一地点不同处理间在  $P<0.05$  水平差异显著; NS: 不显著; \*, \*\*, \*\*\*分别表示在  $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$  水平上显著。Description of each treatment is shown in the table 2. Values followed by different letters in the same column are significantly different in the same site ( $P<0.05$ ). \*, \*\* and \*\*\* represent significant effects at  $P<0.05$ ,  $P<0.01$  and  $P<0.001$  probability levels, respectively; NS: no significant effect.

穗数无显著影响,但对千粒重和产量则具有极显著影响( $P<0.001$ );处理除对千粒重无显著影响效应外,其余指标则均达极显著水平( $P<0.001$ );两者交互作用对冬小麦产量及产量构成因子则均未达显著水平。

## 2.2 养分专家系统推荐施肥对冬小麦植株养分含量的影响

不同施肥处理对冬小麦各生育期植株和籽粒氮磷钾含量如图 1 和图 2 所示。施肥状态下(FP、ST、NE、RNE)的植株和籽粒养分含量较高,整体高于肥料减施(NE-N、NE-P、NE-K)。随着生育期的推进,两个试验地植株氮磷钾含量整体均呈现降低趋势。折线图为生育期植株氮磷钾含量状况:植株氮含量整体表现为 ST>NE>RNE>FP;植株磷含量各施肥处理以 RNE 处理最高,FP 处理最低;植株钾含量整体表

现为 RNE>NE>ST>FP。柱状图为不同施肥水平条件下成熟期冬小麦籽粒氮磷钾含量状况:籽粒氮含量鹤壁点以 NE 处理最高, RNE 处理次之, FP 处理最低, NE、RNE 较 FP 处理氮含量增幅分别为 5.9%、5.3%;新乡点则是 ST 处理最高, NE 处理次之, FP 处理最低, ST、NE 较 FP 处理氮含量增幅分别为 8.7%、6.1%。籽粒磷含量和钾含量在两地表现的趋势一致,均为 RNE 处理最高, NE 处理次之, FP 处理最低,其中, NE、RNE 较 FP 处理磷含量增幅分别为 3.5%~5.6%、5.3%~6.5%,钾含量增幅分别为 6.2%~11.1%、7.9%~11.1%。冬小麦不同施肥处理在鹤壁(图 1)和新乡(图 2)整体呈现相同的趋势,基于养分专家系统推荐施肥的植株/籽粒养分含量整体高于当地农民习惯施肥。

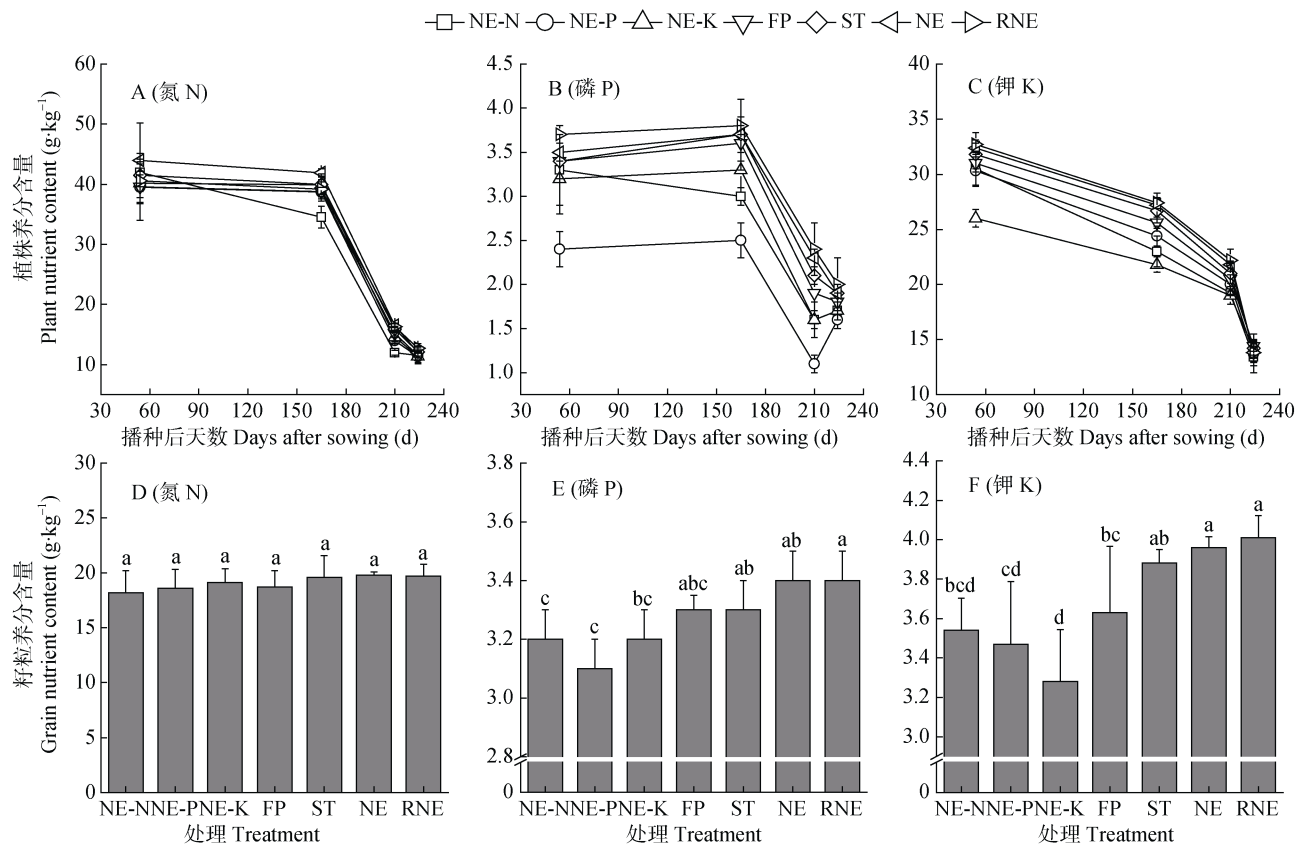


图 1 不同施肥处理对鹤壁冬小麦不同时期养分含量的影响

Fig. 1 Effects of different fertilization treatments on nutrients contents of winter wheat in Hebi at different growth stages  
各处理详见表 2。图 A-C 分别为不同时期冬小麦植株氮磷钾含量,图 D-F 分别为冬小麦成熟期籽粒氮磷钾含量。柱形图不同小写字母表示不同处理间在  $P<0.05$  水平差异显著。Description of each treatment is shown in the table 2. Figure A-C show the plant nitrogen, phosphorus and potassium contents of winter wheat at different times. Figure D-F show the grain nitrogen, phosphorus and potassium contents of winter wheat at maturity stage. Different lowercase letters mean significant differences among treatments ( $P<0.05$ ).

## 2.3 养分专家系统推荐施肥对冬小麦干物质转运与积累特征的影响

施肥(FP、ST、NE、RNE)较肥料减施(NE-N、NE-P、NE-K)可显著影响冬小麦花前干物质转运量和转运率、花前干物质转运对籽粒干物质积累贡献率、

花后干物质积累量和花后干物质积累对籽粒干物质积累贡献率( $P<0.05$ ),对收获指数无显著影响(表 4)。地点和施肥处理交互显著影响收获指数,对其他指标无显著影响。进一步研究分析,在鹤壁养分专家系统推荐施肥显著影响了冬小麦花后干物质积累量,

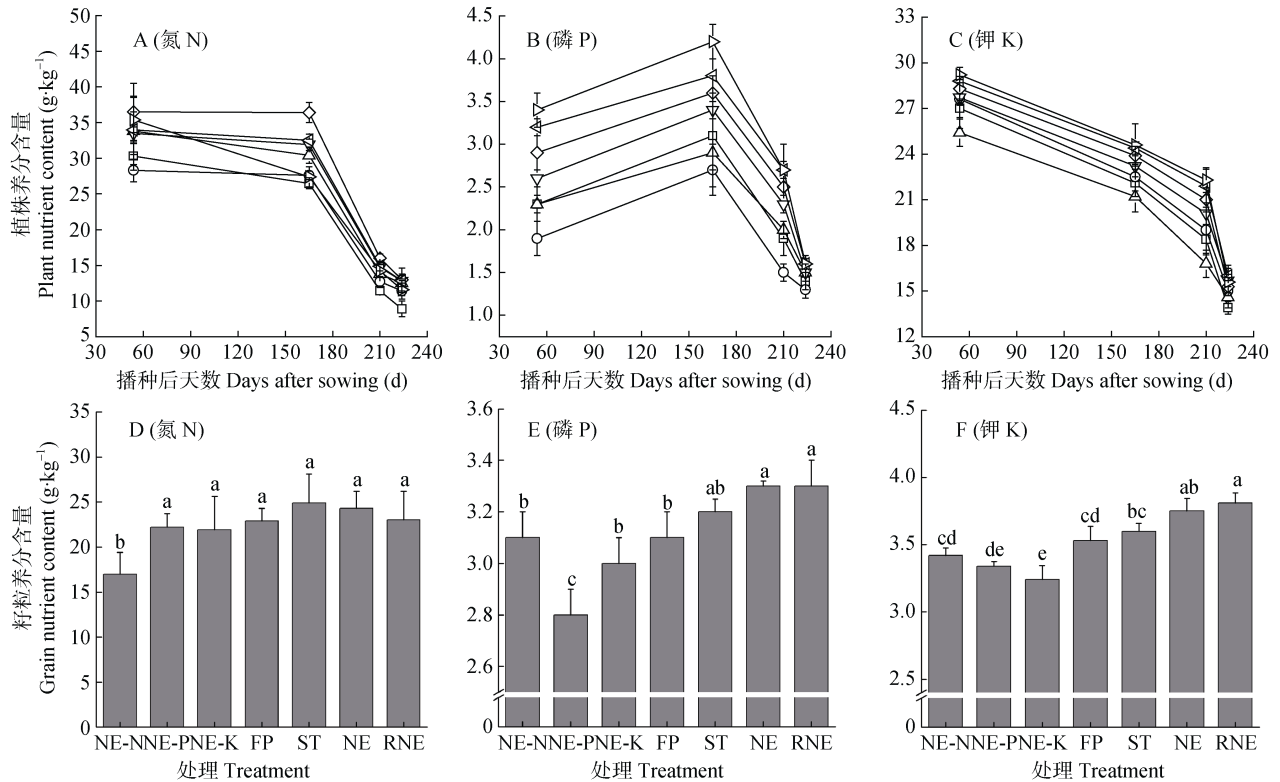


图 2 不同施肥处理对新乡冬小麦各时期养分含量的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on nutrients contents of winter wheat in Xinxiang at different growth stages

各处理详见表 2。图 A-C 分别为不同时期冬小麦植株氮磷钾含量, 图 D-F 分别为冬小麦成熟期籽粒氮磷钾含量。柱形图不同小写字母表示不同处理间在  $P < 0.05$  水平上差异显著。Description of each treatment is shown in the table 2. Figure A-C show the plant nitrogen, phosphorus and potassium contents of winter wheat at different times. Figure D-F show the grain nitrogen, phosphorus and potassium contents of winter wheat at maturity stage. Different letters mean significant differences among treatments ( $P < 0.05$ ).

NE、RNE 较 FP 处理分别提高 14.0% 和 11.9%, 较 ST 处理分别提高 8.3% 和 6.3%; 在新乡养分专家系统推荐施肥显著影响了冬小麦花前干物质转运量和花后干物质积累量, NE、RNE 较 FP 处理分别增加 15.6%、17.1% 和 9.2%、18.6%, 与 ST 处理无显著性差异。

## 2.4 养分专家系统推荐施肥对冬小麦养分吸收与利用特征的影响

### 2.4.1 氮素积累、转运及对籽粒的贡献率

由表 5 可知, 施氮可显著提高冬小麦各生育期氮素积累量, 不同施肥处理显著影响花前氮素转运量 ( $P < 0.05$ )。在鹤壁, 除花前氮素转运量以外, 不同施肥处理显著影响花后氮素积累量, 对其他指标无显著影响, 其中 NE、RNE 处理的花前氮素转运量和花后氮素积累量较 FP 处理分别提高 6.2%、17.2% 和 26.1%、5.7%; 在新乡, 花前氮素转运量和花后氮素积累量的变化趋势与鹤壁点相同, 其中 NE、RNE 处理的花前氮素转运量和花后氮素积累量较 FP 处理分别提高 15.4%、13.3% 和 20.5%、16.2%, 除此之外, ST 处理的花前氮素转运率和花前氮素转运对籽粒氮素积累贡献率较其他处理显著增加, 这可能与冬小麦的施肥量有关, 具体原因需要进一步探究。

### 2.4.2 磷素积累、转运及对籽粒的贡献率

施磷可显著提高冬小麦各生育期磷素积累量, NE、RNE 处理的磷素积累量较 FP 处理显著提高, 不同施肥处理显著影响花前磷素转运量 (表 6) ( $P < 0.05$ )。在鹤壁, NE、RNE 处理的花前磷素转运量较 FP 处理分别提高 47.2%、50.2%, 除花前磷素转运量以外, 不同施肥处理还显著影响花前磷素转运率、花前磷素转运对籽粒磷素积累贡献率、花后磷素积累量和磷素积累对籽粒磷素积累贡献率; 在新乡, NE、RNE 处理的花前磷素转运量较 FP 处理分别提高 14.3%、12.9%, 除花前磷素转运量外, 不同施肥处理 (FP、ST、NE、RNE) 对其他指标无显著影响 ( $P < 0.05$ )。

### 2.4.3 钾素积累、转运及对籽粒的贡献率

施钾可显著提高冬小麦各生育期钾素积累量, 在成熟期 NE、RNE 处理的钾素积累量与 FP 处理无显著影响, 不同施肥处理显著影响花前钾素转运对籽粒钾素积累贡献率 ( $P < 0.05$ ) (表 7)。在鹤壁, NE、RNE 处理的花前钾素转运对籽粒钾素积累贡献率较 FP 处理分别提高 13.5%、80.7%, 较 ST 处理分别提高 5.1% 和 51.0%, 不同施肥处理对其他指标没有显著性影响。在新乡, 不同施肥处理还对花前钾素转

表 4 不同施肥处理对冬小麦开花前后营养器官干物质转运及籽粒干物质积累的影响

Table 4 Effects of different fertilization treatments on dry matter transport of vegetative organs and dry matter accumulation in grains of winter wheat before and after anthesis

| 地点<br>Site     | 处理<br>Treatment | 收获指数<br>Harvest index | 花前 Before anthesis         |              |              | 花后 After anthesis          |              |
|----------------|-----------------|-----------------------|----------------------------|--------------|--------------|----------------------------|--------------|
|                |                 |                       | DMR (kg·hm <sup>-2</sup> ) | DMRE (%)     | DMRCG (%)    | DMA (kg·hm <sup>-2</sup> ) | DMAC (%)     |
| 鹤壁<br>Hebi     | NE-N            | 0.49±0.06a            | 1 801.2±234.26bc           | 16.85±1.24ab | 18.94±1.45b  | 5 182.13±611.16c           | 77.73±4.32b  |
|                | NE-P            | 0.49±0.05a            | 1 227.95±172.82d           | 14.25±1.39b  | 14.23±1.73c  | 7 622.05±372.90ab          | 85.77±1.73a  |
|                | NE-K            | 0.48±0.02a            | 1 660.85±137.56c           | 14.83±1.41b  | 18.56±1.55b  | 7 255.82±818.30b           | 81.44±1.55ab |
|                | FP              | 0.49±0.03a            | 2 080.13±253.84ab          | 17.80±2.05a  | 22.31±2.55a  | 7 236.54±447.53b           | 77.69±2.55b  |
|                | ST              | 0.50±0.04a            | 2 062.36±128.12ab          | 18.51±2.34a  | 21.29±0.98ab | 7 620.97±187.22ab          | 78.71±0.98b  |
|                | NE              | 0.50±0.04a            | 2 165.62±198.92ab          | 19.13±1.67a  | 22.23±2.29a  | 8 251.05±520.38a           | 77.77±2.29b  |
| 新乡<br>Xinxiang | RNE             | 0.49±0.02a            | 2 202.33±260.61a           | 17.82±1.12a  | 22.39±2.61a  | 8 097.67±195.07a           | 77.61±2.61b  |
|                | NE-N            | 0.39±0.02a            | 600.43±87.13e              | 8.92±1.23c   | 14.06±1.25c  | 4 516.24±433.95c           | 86.94±2.80a  |
|                | NE-P            | 0.38±0.04a            | 835.07±72.24d              | 9.04±0.81c   | 16.24±1.99c  | 4 531.59±219.45c           | 83.76±1.99a  |
|                | NE-K            | 0.41±0.03a            | 1 372.12±144.38c           | 13.95±2.24b  | 22.86±2.16b  | 4 794.55±393.22bc          | 77.14±2.16b  |
|                | FP              | 0.40±0.02a            | 1 697.46±148.72b           | 15.37±0.38ab | 27.07±3.00a  | 4 885.88±497.94bc          | 72.93±3.00c  |
|                | ST              | 0.40±0.02a            | 1 902.90±136.71ab          | 16.04±2.23ab | 29.72±1.82a  | 4 763.76±289.86bc          | 70.28±1.82c  |
|                | NE              | 0.40±0.03a            | 1 963.02±214.31a           | 16.61±1.60a  | 29.39±3.27a  | 5 336.98±623.67ab          | 70.61±3.27c  |
|                | RNE             | 0.39±0.04a            | 1 987.76±130.59a           | 17.57±1.84a  | 28.90±0.42a  | 5 795.57±496.68a           | 71.10±0.42c  |
| ANOVA          |                 |                       |                            |              |              |                            |              |
| 试验地点(S)        | ***             |                       | **                         | **           | *            | ***                        | *            |
| 处理(T)          | NS              |                       | NS                         | NS           | NS           | NS                         | NS           |
| S×T            | ***             |                       | NS                         | NS           | NS           | NS                         | NS           |

各处理详见表 2。DMR: 干物质转运量; DMRE: 干物质转运率; DMRCG: 干物质转运对籽粒干物质积累贡献率; DMA: 干物质积累量; DMAC: 干物质积累对籽粒干物质积累贡献率。同列数据后不同小写字母表示同一地点不同处理间在  $P<0.05$  水平差异显著; NS: 不显著; \*, \*\*, \*\*\* 分别表示在  $P<0.05$ 、 $P<0.01$  和  $P<0.001$  水平显著。Description of each treatment is shown in the table 2. DMR: dry matter remobilization; DMRE: dry matter remobilization rate; DMRCG: contribution of dry matter remobilization to grain; DMA: dry matter accumulation; DMAC: contribution of dry matter accumulation to grain. Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different for the same place ( $P<0.05$ ). \*, \*\* and \*\*\* represent significant effects at  $P<0.05$ ,  $P<0.01$  and  $P<0.001$  probability levels, respectively; NS: no significant effect.

运量和花后钾素积累对籽粒钾素积累贡献率存在显著影响( $P<0.05$ ); NE、RNE 处理的花前钾素转运对籽粒钾素积累贡献率较 FP 处理分别提高 90.1%、77.2%，花后钾素积累对籽粒钾素积累贡献率降低 3.75%、32.4%。

## 2.5 养分专家系统推荐施肥对冬小麦肥料利用效率的影响

由表 8 可知, 两试验区 NE 处理氮、磷、钾肥平均肥料利用率和农学效率分别是 42.4%、19.1%、47.3% 和 11.3%、12.2%、12.4%, RNE 处理氮、磷、钾肥平均肥料利用率和农学效率分别是 41.8%、19.3%、45.9% 和 11.7%、14.2%、14.1%。冬小麦 NE 和 RNE 处理的 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 肥料利用率和农学效率并未存在显著差异, 两地肥效指标表现出相同的趋势。

## 3 讨论

### 3.1 产量效应与干物质转运和积累的关系

氮磷钾肥平衡施用是实现作物高效生产的关键技术, 优化和平衡施肥可显著提高冬小麦成熟期产

量<sup>[5-6]</sup>。试验结果表明, 相比于肥料减施(NE-N, NE-P 和 NE-K)、农民习惯(FP)和农技部门推荐施肥(ST)处理, 基于养分专家系统的推荐施肥(NE 和 RNE)均有较好的增产效应(表 3), 这与王宜伦等<sup>[5]</sup>在小麦-玉米上施肥增产、且氮磷钾肥平衡施用增产效果最好的结论相一致。NE 与 FP 处理相比, 增施钾肥的基础上进行减氮减磷, 冬小麦产量较 FP 处理分别增产 4.7%和 6.6%, 与 ST 处理相比, 氮、磷、钾肥的大幅度减施并没有造成冬小麦减产, 说明合理的氮磷钾配施是冬小麦增产的关键<sup>[14]</sup>; 缓控施肥处理(RNE)较 NE 处理增产 0.9%~2.7%, 减少施肥次数并未造成明显减产, 宋亚栋<sup>[27]</sup>研究说明合理配施缓控释肥可以提高作物干物质的积累和养分的吸收, 从而促进产量的提高。试验地点显著影响冬小麦的千粒重, 施肥处理对穗粒数和穗数具有极显著影响。李岚涛等<sup>[28]</sup>在小麦、玉米上的研究同样验证了冬小麦产量受地点和处理的双重影响, 地点与处理互作无显著影响, 不同施肥处理通过何种途径造成产量因子的差异仍需要进一步探究。



表 5 不同施肥处理对冬小麦氮素积累、转运及对籽粒的贡献率

Table 5 N accumulation, transport and contribution rate to grain of winter wheat under different fertilization treatments

| 地点<br>Site     | 处理<br>Treatment | 氮积累<br>Nitrogen accumulation ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) |                |                |                | 花前<br>Before anthesis                    |             |             | 花后<br>After anthesis                     |            |
|----------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------------------|-------------|-------------|------------------------------------------|------------|
|                |                 | 分蘖<br>Tillering                                                 | 拔节<br>Jointing | 开花<br>Anthesis | 成熟<br>Maturity | NR<br>( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) | NRE<br>(%)  | NRCG<br>(%) | NA<br>( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) | NAC<br>(%) |
| 鹤壁<br>Hebi     | NE-N            | 18.2±1.1c                                                       | 101.0±13.3d    | 123.7±12.8d    | 177.9±19.8c    | 93.0±9.3d                                | 75.2±1.5a   | 63.9±6.2a   | 49.2±3.3a                                | 36.1±3.8a  |
|                | NE-P            | 19.0±2.0bc                                                      | 125.6±12.9c    | 151.5±12.9c    | 199.1±12.4bc   | 115.6±8.1cd                              | 76.3±1.1a   | 72.8±12.8a  | 45.2±5.3ab                               | 27.2±12.8a |
|                | NE-K            | 20.3±2.4bc                                                      | 140.3±2.7bc    | 164.1±23.0bc   | 211.1±8.3ab    | 124.2±14.1bc                             | 75.3±4.5a   | 74.5±17.3a  | 43.3±5.6ab                               | 25.5±17.0a |
|                | FP              | 22.0±2.6bc                                                      | 157.9±4.8b     | 178.2±19.1abc  | 217.9±16.2ab   | 134.8±20.9bc                             | 75.4±4.1a   | 78.2±17.5a  | 39.8±6.0b                                | 21.8±17.5a |
|                | ST              | 23.5±2.3ab                                                      | 191.0±11.7a    | 185.8±15.5ab   | 233.3±25.7a    | 142.3±12.4ab                             | 76.6±1.0a   | 75.1±1.7a   | 47.2±4.4ab                               | 24.9±1.7a  |
|                | NE              | 27.7±3.8a                                                       | 214.1±13.7a    | 186.8±18.2ab   | 235.7±6.0a     | 143.2±13.8ab                             | 76.6±1.3a   | 74.1±7.8a   | 50.2±6.1a                                | 25.9±7.8a  |
|                | RNE             | 27.2±2.8a                                                       | 203.1±28.1a    | 201.3±5.3a     | 230.0±5.6a     | 158.0±3.4a                               | 78.5±1.4a   | 81.9±4.8a   | 42.1±5.6ab                               | 18.1±4.8a  |
| 新乡<br>Xinxiang | NE-N            | 23.1±1.8c                                                       | 63.4±5.4e      | 87.6±4.1e      | 101.4±5.1c     | 61.2±4.4e                                | 69.9±3.2ab  | 72.0±0.9abc | 23.8±2.1c                                | 28.0±0.9bc |
|                | NE-P            | 22.9±1.0c                                                       | 88.4±2.7d      | 117.6±4.6d     | 163.9±11.6b    | 74.9±3.6e                                | 63.7±1.7c   | 65.7±3.5bc  | 39.6±8.2abc                              | 34.4±3.5ab |
|                | NE-K            | 28.2±2.3bc                                                      | 113.0±15.7c    | 136.2±6.3c     | 177.3±19.4b    | 90.5±5.5d                                | 66.4±2.9bc  | 62.6±5.6c   | 54.4±9.7a                                | 37.5±5.6a  |
|                | FP              | 30.6±3.30ab                                                     | 131.6±17.7abc  | 161.6±6.0b     | 203.6±13.2a    | 106.8±4.5c                               | 66.1±2.7bc  | 74.4±5.1ab  | 37.0±8.6abc                              | 25.7±5.1cd |
|                | ST              | 34.5±5.07a                                                      | 151.8±16.1a    | 186.9±13.1a    | 210.2±11.8a    | 135.9±9.1a                               | 72.7±0.8a   | 80.7±7.1a   | 33.3±3.6bc                               | 19.3±2.2d  |
|                | NE              | 32.4±3.06ab                                                     | 144.0±5.7ab    | 179.1±12.6ab   | 215.4±9.7a     | 123.2±3.7ab                              | 68.9±2.9ab  | 74.7±9.4ab  | 43.0±18.9abc                             | 25.3±3.1cd |
|                | RNE             | 36.0±3.39a                                                      | 128.4±10.6bc   | 176.4±14.4ab   | 210.9±13.4a    | 121.0±16.4bc                             | 68.4±3.9abc | 73.0±7.2abc | 44.6±11.0ab                              | 27.0±2.9c  |

各处理详见表 2。NR: 花前氮素转运量; NRE: 花前氮素转运率; NRCG: 花前氮素转运对籽粒氮素积累贡献率; NA: 花后氮素积累量; NAC: 氮素积累对籽粒氮素积累贡献率。同列数据后不同小写字母表示同一地点不同处理间在  $P<0.05$  水平差异显著; NS: 不显著; \*, \*\*, \*\*\* 分别表示在  $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$  水平上显著。Description of each treatment is shown in the table 2. NR: N remobilization before anthesis; NRE: N remobilization efficiency before anthesis; NRCG: contribution of N remobilization to grain N before anthesis; NA: N accumulation after anthesis; NAC: contribution of N accumulation to grain after anthesis N. Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different for the same site ( $P<0.05$ ). \*, \*\* and \*\*\* represent significant effects at  $P<0.05$ ,  $P<0.01$  and  $P<0.001$  probability levels, respectively; NS: no significant effect.

表 6 不同施肥处理对冬小麦磷素积累、转运及对籽粒的贡献率

Table 6 P accumulation, transport and contribution rate to grain of winter wheat under different fertilization treatments

| 地点<br>Site     | 处理<br>Treatment | 磷积累<br>Phosphorus accumulation ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) |                |                |                | 花前<br>Before anthesis                    |            |             | 花后<br>After anthesis                     |            |
|----------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------------------|------------|-------------|------------------------------------------|------------|
|                |                 | 分蘖<br>Tillers                                                     | 拔节<br>Jointing | 开花<br>Anthesis | 成熟<br>Maturity | PR<br>( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) | PRE<br>(%) | PRCG<br>(%) | PA<br>( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) | PAC<br>(%) |
| 鹤壁<br>Hebi     | NE-N            | 1.4±0.2d                                                          | 8.8±1.1c       | 16.4±1.95d     | 28.1±0.96d     | 14.1±2.2d                                | 85.5±3.6ab | 54.6±3.9b   | 11.6±1.4bc                               | 45.1±10.0b |
|                | NE-P            | 1.2±0.1e                                                          | 9.3±1.1c       | 11.4±0.96e     | 28.8±0.47d     | 9.1±0.8e                                 | 79.5±1.9c  | 34.3±4.1c   | 17.4±1.7a                                | 65.7±4.1a  |
|                | NE-K            | 1.6±0.1cd                                                         | 11.7±0.7bc     | 17.9±1.24cd    | 31.4±0.58c     | 15.0±1.2cd                               | 83.4±0.9b  | 52.8±5.6b   | 13.5±1.9b                                | 47.3±5.6b  |
|                | FP              | 1.8±0.1bc                                                         | 14.1±1.3b      | 20.9±0.55c     | 33.7±0.43b     | 17.5±0.2c                                | 83.7±1.1b  | 57.6±1.0b   | 12.8±0.4bc                               | 42.4±1.0b  |
|                | ST              | 1.9±0.1b                                                          | 17.5±1.2a      | 24.8±1.89b     | 35.9±0.51a     | 21.3±1.7b                                | 85.8±0.3ab | 65.9±6.5ab  | 11.1±1.3c                                | 34.1±6.5bc |
|                | NE              | 2.2±0.2a                                                          | 19.1±2.4a      | 29.5±1.20a     | 36.5±0.74a     | 25.8±1.0a                                | 87.5±1.0a  | 78.6±4.6a   | 7.0±0.7d                                 | 21.4±4.6c  |
|                | RNE             | 2.4±0.2a                                                          | 20.1±2.8a      | 30.0±4.23a     | 37.2±1.71a     | 26.3±3.5a                                | 87.5±2.9a  | 78.4±15.3a  | 7.4±1.1d                                 | 21.6±15.3c |
| 新乡<br>Xinxiang | NE-N            | 1.8±0.2d                                                          | 7.1±0.9e       | 15.7±2.03d     | 17.1±1.31e     | 13.1±1.9d                                | 83.1±1.5a  | 87.9±7.0ab  | 2.1±0.2b                                 | 12.1±7.0ab |
|                | NE-P            | 1.6±0.2d                                                          | 8.3±1.1e       | 15.1±2.09d     | 17.4±1.10e     | 12.2±1.2d                                | 80.5±2.5ab | 81.0±10.8b  | 2.8±0.4a                                 | 19.0±10.8a |
|                | NE-K            | 1.9±0.3cd                                                         | 10.3±1.0d      | 21.2±1.28c     | 21.5±0.72d     | 17.8±1.4c                                | 83.8±1.9a  | 87.8±3.8ab  | 1.9±0.3bc                                | 12.1±1.3ab |
|                | FP              | 2.3±0.2c                                                          | 13.2±0.8c      | 23.5±1.47bc    | 24.1±0.63c     | 18.7±1.6bc                               | 79.3±2.1b  | 93.0±6.1a   | 1.7±0.3bc                                | 7.0±0.9b   |
|                | ST              | 2.8±0.4b                                                          | 15.0±1.19bc    | 25.6±1.72ab    | 25.2±1.07bc    | 20.3±1.5abc                              | 79.3±2.3b  | 94.0±1.9a   | 1.3±0.5c                                 | 6.0±1.9b   |
|                | NE              | 3.0±0.3b                                                          | 16.6±0.93b     | 27.0±1.02a     | 27.4±1.88ab    | 21.4±1.3a                                | 79.1±2.1b  | 91.5±6.8ab  | 1.4±0.2c                                 | 8.5±0.9b   |
|                | RNE             | 3.5±0.2a                                                          | 19.3±1.33a     | 27.4±1.21a     | 28.8±1.31a     | 21.1±1.0ab                               | 77.2±1.3b  | 92.5±1.7a   | 1.7±0.5bc                                | 7.5±1.0b   |

各处理详见表 2。PR: 花前磷素转运量; PRE: 花前磷素转运率; PRCG: 花前磷素转运对籽粒磷素积累贡献率; PA: 花后磷素积累量; PAC: 磷素积累对籽粒磷素积累贡献率。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: 不显著; \*, \*\*, \*\*\* 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上显著。Description of each treatment is shown in the table 2. PR: P remobilization before anthesis; PRE: P remobilization efficiency before anthesis; PRCG: contribution of P remobilization before anthesis to grain P; PA: P accumulation after anthesis; PAC: contribution of P accumulation after anthesis to grain P. Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different for the same site ( $P<0.05$ ). \*, \*\* and \*\*\* represent significant effects at  $P<0.05$ ,  $P<0.01$  and  $P<0.001$  probability levels, respectively; NS: no significant effect.



表 7 不同施肥处理对冬小麦钾素积累、转运及对籽粒的贡献率

Table 7 K accumulation, transport and contribution rate to grain of winter wheat under different fertilizer treatments

| 地点<br>Site     | 处理<br>Treatment | 钾积累<br>Potassium accumulation ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) |                |                |                | 花前<br>Before anthesis                    |            |             | 花后<br>After anthesis                     |             |
|----------------|-----------------|------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------------------|------------|-------------|------------------------------------------|-------------|
|                |                 | 分蘖<br>Tillers                                                    | 拔节<br>Jointing | 开花<br>Anthesis | 成熟<br>Maturity | KR<br>( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) | KRE<br>(%) | KRCG<br>(%) | KA<br>( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) | KAC<br>(%)  |
|                |                 |                                                                  |                |                |                |                                          |            |             |                                          |             |
| 鹤壁<br>Hebi     | NE-N            | 13.2±0.9e                                                        | 67.2±7.3c      | 197.0±23.2c    | 221.2±21.4b    | 11.3±1.5b                                | 5.7±0.5a   | 39.2±1.8bc  | 17.5±4.6bcd                              | 60.8±3.6bc  |
|                | NE-P            | 14.5±0.1de                                                       | 78.5±5.9c      | 219.3±23.4bc   | 242.7±30.2ab   | 13.3±1.5b                                | 6.0±0.2a   | 44.2±3.4b   | 16.7±2.0cd                               | 55.9±4.0c   |
|                | NE-K            | 13.0±0.3e                                                        | 76.8±2.6c      | 223.0±12.2abc  | 261.0±18.4ab   | 12.8±1.3b                                | 4.1±0.1a   | 29.8±3.4d   | 21.3±2.5abc                              | 70.1±5.8a   |
|                | FP              | 16.7±0.7cd                                                       | 102.0±6.4b     | 239.6±25.2ab   | 272.4±22.9a    | 11.1±1.0b                                | 4.7±0.6a   | 32.6±4.2cd  | 22.7±1.7a                                | 67.2±6.8ab  |
|                | ST              | 18.1±2.7bc                                                       | 127.6±10.6a    | 245.8±14.1ab   | 270.5±23.8ab   | 13.7±1.3b                                | 5.6±0.4a   | 39.0±2.3bc  | 21.4±1.5abc                              | 62.0±4.7abc |
|                | NE              | 20.5±1.3ab                                                       | 139.5±16.6a    | 250.5±21.5ab   | 272.4±41.6a    | 13.3±2.1b                                | 5.3±0.7a   | 37.0±4.0c   | 21.9±2.6ab                               | 63.0±4.6abc |
|                | RNE             | 21.9±1.8a                                                        | 146.0±21.6a    | 258.4±10.2a    | 272.7±22.6a    | 18.8±1.9a                                | 8.0±6.4a   | 58.9±5.3a   | 14.3±1.8d                                | 41.0±4.3d   |
| 新乡<br>Xinxiang | NE-N            | 20.6±0.6d                                                        | 52.7±3.4e      | 149.0±5.2c     | 165.2±19.8c    | 6.8±0.8cd                                | 4.6±0.5ab  | 41.5±3.3c   | 9.5±1.3b                                 | 58.6±2.9b   |
|                | NE-P            | 22.4±1.6cd                                                       | 72.3±5.8d      | 188.5±16.2b    | 206.3±3.8b     | 6.3±0.8cd                                | 3.3±0.3bc  | 35.8±1.5cd  | 11.1±1.2b                                | 64.1±3.9b   |
|                | NE-K            | 21.4±2.1d                                                        | 78.3±5.4cd     | 186.2±12.0b    | 215.0±18.1b    | 5.2±0.6d                                 | 2.8±0.8c   | 25.3±3.5e   | 15.4±2.2a                                | 74.6±5.1a   |
|                | FP              | 25.2±2.8bc                                                       | 93.0±10.3bc    | 235.1±7.0a     | 250.5±20.4a    | 7.8±0.9c                                 | 2.7±0.2c   | 29.4±1.5de  | 15.5±2.7a                                | 70.7±3.9a   |
|                | ST              | 26.7±1.9ab                                                       | 99.7±9.2ab     | 242.7±17.19a   | 247.5±16.0a    | 11.1±1.1b                                | 4.7±0.8ab  | 49.0±4.2b   | 11.4±2.5b                                | 50.7±50.2c  |
|                | NE              | 27.5±2.5ab                                                       | 108.1±5.0ab    | 258.3±14.99a   | 269.1±8.8a     | 13.8±1.1a                                | 5.4±1.7a   | 55.9±5.3a   | 10.9±1.4b                                | 44.2±6.2d   |
|                | RNE             | 29.7±0.5a                                                        | 115.6±13.98a   | 258.6±26.29a   | 267.0±13.4a    | 12.7±1.2ab                               | 4.9±0.4a   | 52.1±4.1ab  | 11.7±1.1b                                | 47.8±4.8cd  |

各处理详见表 2。KR: 花前钾素转运量; KRE: 花前钾素转运率; KRCG: 花前钾素转运对籽粒钾素积累贡献率; KA: 花后钾素积累量; KAC: 钾素积累对籽粒钾素积累贡献率。同列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: 不显著; \*, \*\*, \*\*\* 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上显著。Description of each treatment is shown in the table 2. KR: K remobilization before anthesis; KRE: K remobilization efficiency before anthesis; KRCG: contribution of K remobilization before anthesis to grain K; KA: K accumulation after anthesis; KAC: contribution of K accumulation after anthesis to grain K. Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different for the same site ( $P<0.05$ ). \*, \*\* and \*\*\* represent significant effects at  $P<0.05$ ,  $P<0.01$  and  $P<0.001$  probability levels, respectively; NS: no significant effect.

表 8 不同施肥处理对冬小麦肥料效率指标的影响

Table 8 Effects of different fertilization treatments on the fertilizer efficiency of winter wheat

| 地点<br>Site     | 处理<br>Treatment | 肥料利用率<br>Fertilizer utilization efficiency (%) |                               |                  | 农学效率<br>Agronomic efficiency ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) |                               |                  |
|----------------|-----------------|------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|
|                |                 | N                                              | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | N                                                               | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O |
|                |                 |                                                |                               |                  |                                                                 |                               |                  |
| 鹤壁<br>Hebi     | NE              | 36.8                                           | 18.8                          | 45.4             | 10.6                                                            | 11.3                          | 12.0             |
|                | RNE             | 34.7                                           | 18.6                          | 43.6             | 10.4                                                            | 14.3                          | 14.1             |
| 新乡<br>Xinxiang | NE              | 48.0                                           | 19.3                          | 49.1             | 12.0                                                            | 13.0                          | 12.8             |
|                | RNE             | 48.9                                           | 20.0                          | 48.1             | 13.0                                                            | 14.0                          | 14.1             |

各处理详见表 2。Description of each treatment is shown in the table 2.

作物花后干物质和花前营养器官干物质向籽粒的转运会影响作物的产量<sup>[25]</sup>。在本研究中, NE、RNE 处理干物质转运对籽粒干物质积累平均贡献率 (DMRCG) 分别为 4.1% 和 3.6%。干物质是小麦光合作用积累的产物, 籽粒产量所形成的物质来源于干物质, 因此可以通过提高干物质积累量增加冬小麦产量<sup>[27]</sup>。本试验结果表明, 基于专家系统的推荐施肥显著提高了冬小麦花后干物质积累量, NE、RNE 较 FP 处理分别提高 9.2%~14.0%、11.9%~18.6%。王新民等<sup>[29]</sup>研究认为, 施用缓控施肥促进孕穗期后干物质的迅速积累, 显著提高冬小麦中后期干物质

的质量, RNE 较 NE 处理花后干物质积累量(DMA) 平均提高 3.4%, 该结果进一步解释了 RNE 处理可显著提高冬小麦产量的原因。平衡施肥可使作物获得充足、持续且均衡的养分供应, 在确保高产的同时, 又能有效促进养分的同化和转运能力<sup>[14,25]</sup>。

### 3.2 肥料效应与养分转运和积累的关系

氮磷钾平衡施用利于作物对养分的吸收利用, 提高肥料利用效率<sup>[30]</sup>。肥料利用率、肥料农学效率和肥料偏生产力是评价肥料综合效应的重要参考指标<sup>[26,31]</sup>。张福锁等<sup>[32]</sup>对全国粮食主产区进行的 1 333 个田间试验结果显示, 小麦氮、磷、钾肥料利用率分别为  $28.2 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $10.7 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $30.3 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 肥料农学效率分别是  $8.0 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $7.3 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $5.3 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。本试验中, 基于养分专家系统的推荐施肥优化了氮、磷、钾肥配比, 促进冬小麦对氮、磷、钾养分的吸收利用, NE、RNE 处理的肥料利用率和农学效率均高于全国平均水平, RNE 较 NE 处理减少了施肥次数, 却并未降低冬小麦肥料利用效率(表 8) 和产量(表 3)。柴婕等<sup>[33]</sup>研究表明土壤肥力水平决定肥料利用效率, 肥力越低施肥后的作物产量反应越大, 肥料利用率越高, 这可以用来解释新乡基础肥

力低而肥料利用效率高于鹤壁的原因。肥料利用效率的差异首先从养分转运与积累角度进行分析, 数据表明氮磷钾平衡施用可有效提高冬小麦籽粒中的养分含量(图 1, 图 2), 提高籽粒养分含量是提高冬小麦肥料利用率的途径之一。进一步研究显示, 施肥可显著提高冬小麦各生育期养分积累量, 氮磷钾均衡施肥可显著提高冬小麦花前氮转运量(NR)、磷转运量(NP)和钾素转运对籽粒钾素积累贡献率(KRCG), 基于养分专家系统的推荐施肥(NE、RNE)较 FP 处理 NR、PR、KRCG 平均值分别提高 13.0%、31.5%和 65.5%, 这与宋亚栋<sup>[27]</sup>在冬小麦上合理施肥提高前期养分积累量的研究一致, 随鹏祥等<sup>[25]</sup>在春玉米的研究上也得到了同样的结论。过量施肥会造成养分盈余, 导致资源严重浪费和环境污染, 施肥不足则影响开花期养分的吸收能力和灌浆期籽粒的结实。这也进一步说明了合理施肥的重要意义和养分专家系统的实用性。

#### 4 结论

氮磷钾合理配施有效提高冬小麦产量和肥料利用效率, 基于养分专家系统的推荐施肥(NE、RNE)较当地农民习惯施肥(FP)优化了氮磷钾的配比, 氮、磷施用量分别降低 16.2%~19.5%、43.3%~48.0%, 钾肥适当提高 13.2%~57.9%, 冬小麦产量分别增产 4.7%~6.6%、5.5%~9.6%。NE 和 RNE 处理还可显著增加地上部植株养分含量和积累量, 以及花后干物质积累量、花前氮磷素转运量和钾素转运对籽粒钾素积累贡献率。综上所述, 养分专家推荐施肥在保证产量的基础上可以减少肥料的投入, 降低养分损失, 具有增产效应, 肥料利用效率较高。

#### 参考文献 References

- [1] 卢峰. 农业供给侧结构改革下河南小麦产能问题研究[J]. 现代面粉工业, 2019, 33(2): 14-19
- [2] 刘倩倩, 陈欢, 张存岭, 等. 新型专用肥对冬小麦产量、氮素吸收与利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(10): 1186-1194
- [3] 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
- [4] 张福锁, 崔振岭, 王激清, 等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. 植物学通报, 2007, 24(6): 687-694
- [5] 王宜伦, 白由路, 王磊, 等. 基于养分专家系统的小麦-玉米推荐施肥效应研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(22): 4483-4492
- [6] 贾良良, 杨军芳, 孙彦铭, 等. 小麦养分专家系统推荐施肥对河北省冬小麦产量、养分效率和环境效应的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (5): 51-55
- [7] 何萍, 徐新朋, 仇少君, 等. 我国北方玉米施肥产量效应和经济效益分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1387-1394
- [8] 刘东海, 陈云峰, 李双来, 等. 养分专家系统推荐施肥对湖北中稻产量和养分利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (4): 84-88
- [9] 张月萌, 司焕森, 薛澄, 等. 不同施肥水平对山药生长发育的影响及基于产量反应的养分用量推荐[J]. 中国土壤与肥料, 2018, (6): 126-135
- [10] 梁俊梅, 张君, 安昊, 等. 养分专家系统推荐施肥对马铃薯产量及肥料利用率的影响[J]. 作物杂志, 2019, (4): 133-138
- [11] 马征, 崔荣宗, 贾德, 等. 氮磷钾平衡施用对大葱产量、养分吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 109-114
- [12] 王丹丹, 崔荣宗, 贾德, 等. 氮磷钾平衡施用对大葱产量、养分吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 109-114
- [13] 王丹丹, 崔荣宗, 贾德, 等. 氮磷钾平衡施用对大葱产量、养分吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 109-114
- [14] 王丹丹, 崔荣宗, 贾德, 等. 氮磷钾平衡施用对大葱产量、养分吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 109-114
- [15] 王丹丹, 崔荣宗, 贾德, 等. 氮磷钾平衡施用对大葱产量、养分吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 109-114
- [16] 王丹丹, 崔荣宗, 贾德, 等. 氮磷钾平衡施用对大葱产量、养分吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 109-114
- [17] 王丹丹, 崔荣宗, 贾德, 等. 氮磷钾平衡施用对大葱产量、养分吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 109-114
- [18] 王丹丹, 崔荣宗, 贾德, 等. 氮磷钾平衡施用对大葱产量、养分吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 109-114
- [19] 王丹丹, 崔荣宗, 贾德, 等. 氮磷钾平衡施用对大葱产量、养分吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 109-114
- [20] 王丹丹, 崔荣宗, 贾德, 等. 氮磷钾平衡施用对大葱产量、养分吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 109-114
- [21] 王丹丹, 崔荣宗, 贾德, 等. 氮磷钾平衡施用对大葱产量、养分吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 109-114
- [22] 王丹丹, 崔荣宗, 贾德, 等. 氮磷钾平衡施用对大葱产量、养分吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 109-114
- [23] 王丹丹, 崔荣宗, 贾德, 等. 氮磷钾平衡施用对大葱产量、养分吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 109-114
- [24] 王丹丹, 崔荣宗, 贾德, 等. 氮磷钾平衡施用对大葱产量、养分吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 109-114
- [25] 随鹏祥, 王丹丹, 崔荣宗, 贾德, 等. 氮磷钾平衡施用对大葱产量、养分吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 109-114
- [26] 王丹丹, 崔荣宗, 贾德, 等. 氮磷钾平衡施用对大葱产量、养分吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 109-114
- [27] 宋亚栋, 王丹丹, 崔荣宗, 贾德, 等. 氮磷钾平衡施用对大葱产量、养分吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 109-114

- [12] REDDY U V B, REDDY G P, REDDY M S, et al. Potassium uptake at different growth stages in relation to yield of maize as influenced by various nitrogen and phosphorus levels during Kharif season[J]. *International Journal of Chemical Studies*, 2019, 7(2): 75–81
- [13] ROBERTS T L. Improving nutrient use efficiency[J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2008, 32(3): 177–182
- [14] 魏建林, 谭德水, 郑福丽, 等. 养分专家系统推荐施肥对小麦玉米产量、效益及养分平衡的影响[J]. *山东农业科学*, 2018, 50(2): 87–92
- WEI J L, TAN D S, ZHENG F L, et al. Effects of nutrient expert recommended fertilization on yield, profit and nutrient balance of maize and wheat[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2018, 50(2): 87–92
- [15] PAMPOLINO M F, WITT C, PASQUIN J M, et al. Development approach and evaluation of the nutrient expert software for nutrient management in cereal crops[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 88: 103–110
- [16] XU X P, XIE J G, HOU Y P, et al. Estimating nutrient uptake requirements for rice in China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 180: 37–45
- [17] 徐新朋, 魏丹, 李玉影, 等. 基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法在东北春玉米上应用的可行性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1458–1467
- XU X P, WEI D, LI Y Y, et al. Availability of fertilizer recommendation for spring maize based on yield response and agronomic efficiency in Northeast China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(6): 1458–1467
- [18] XU X P, HE P, PAMPOLINO M F, et al. Narrowing yield gaps and increasing nutrient use efficiencies using the nutrient expert system for maize in northeast China[J]. *Field Crops Research*, 2016, 194: 75–82
- [19] CHUAN L M, HE P, JIN J Y, et al. Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China[J]. *Field Crops Research*, 2013, 146: 96–104.
- [20] ZHANG J J, DING W C, HE P, et al. Establishment and validation of nutrient expert system for radish fertilization management in China[J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(5): 2435–2444
- [21] ZHANG J J, HE P, XU X P, et al. Nutrient expert improves nitrogen efficiency and environmental benefits for winter wheat in China[J]. *Agronomy Journal*, 2018, 110(2): 696–706
- [22] ZHANG J J, HE P, XU X P, et al. Nutrient Expert improves nitrogen efficiency and environmental benefits for summer maize in China[J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109(3): 1082–1090
- [23] 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
- LYU 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]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(4): 852–860
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30–33
- BAO S D. Soil Agrochemical Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2000: 30–33
- [25] 隋鹏祥, 有德宝, 安俊朋, 等. 秸秆还田方式与施氮量对春玉米产量及干物质和氮素积累、转运的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(2): 316–324
- SUI P X, YOU D B, AN J P, et al. Effects of straw management and nitrogen application on spring maize yield, dry matter and nitrogen accumulation and transfer[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(2): 316–324
- [26] 宋蝶, 陈新兵, 董洋阳, 等. 养分专家系统推荐施肥对苏北地区水稻产量和肥料利用率的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(1): 68–75
- SONG D, CHEN X B, DONG Y Y, et al. Effect of nutrient expert recommendation fertilization on rice yield and fertilizer use in northern Jiangsu Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(1): 68–75
- [27] 宋亚栋. 不同缓控释肥对小麦产量品质与养分利用效率的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2017
- SONG Y D. Effects of different slow and controlled release fertilizers on yield, quality and nutrient use efficiency of wheat[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017
- [28] 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
- LI L T, REN L, YIN H L, et al. 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
- [29] 王新民, 侯彦林, 介晓磊, 等. 冬小麦施用控释氮肥增产效应研究初报[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 12(2): 98–101
- WANG X M, HOU Y L, JIE X L, et al. Effect of applying controlled release nitrogen fertilizer on yield enhancement of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 12(2): 98–101
- [30] YANG X L, LU Y L, TONG Y A, et al. A 5-year lysimeter monitoring of nitrate leaching from wheat-maize rotation system: Comparison between optimum N fertilization and conventional farmer N fertilization[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 199: 34–42
- [31] 闫湘, 金继运, 何萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(2): 450–459
- YAN X, JIN J Y, HE P, et al. Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(2): 450–459
- [32] 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
- [33] 柴婕. 水稻氮、磷、钾肥料效应年间变异分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 14–15
- CHAI J. The annual variation of the responses of rice to applications of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers in paddy field[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 14–15