



**养分专家系统推荐施肥对夏玉米生理特性及产量的影响**

王丹丹, 李岚涛, 韩本高, 张倩, 盛开, 王宜伦

引用本文:

王丹丹, 李岚涛, 韩本高, 等. 养分专家系统推荐施肥对夏玉米生理特性及产量的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(1): 107–117.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0677>

**您可能感兴趣的其他文章**

Articles you may be interested in

**单株定量施肥对夏玉米产量及养分吸收利用的影响**

郭娅, 刘娇, 尹焕丽, 张倩, 李岚涛, 王宜伦

*农业资源与环境学报*. 2020, 37(6): 924–930 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0572>

**包膜尿素和普通尿素混施对夏玉米产量、氮肥利用率和土壤硝态氮残留的影响**

曹兵, 倪小会, 陈延华, 邹国元, 王甲辰, 杨友庆, 陈立娟, 刘杰, 王学霞

*农业资源与环境学报*. 2020, 37(5): 695–701 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0428>

**超微细活化磷肥对小白菜生长及磷利用的影响**

王桂伟, 陈宝成, 王国鹏, 李晗灏, 梁海, 周华敏, 陈剑秋

*农业资源与环境学报*. 2019, 36(1): 9–15 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0065>

**华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响**

蔡媛媛, 王瑞琪, 王丽丽, 刘惠芬, 杨殿林, 谭炳昌

*农业资源与环境学报*. 2020, 37(4): 503–510 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0254>

**控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响**

姬景红, 李玉影, 刘双全, 佟玉欣, 任桂林, 李杰, 刘颖, 张明怡

*农业资源与环境学报*. 2017, 34(2): 153–160 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0231>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王丹丹, 李岚涛, 韩本高, 等. 养分专家系统推荐施肥对夏玉米生理特性及产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 107-117.

WANG D D, LI L T, HAN B G, et al. Effects of nutrient expert recommended fertilization on the physiological characteristics and yield of summer maize[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(1): 107-117.



开放科学 OSID

## 养分专家系统推荐施肥对夏玉米生理特性及产量的影响

王丹丹, 李岚涛, 韩本高, 张倩, 盛开, 王宜伦\*

(河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002)

**摘要:**为探究养分专家系统推荐施肥对夏玉米生理特性的影响,于2019年6月—10月在河南省鹤壁市、新乡市两地同步开展肥效田间试验,设置农户施肥(FP)、经验施肥(ST)、养分专家推荐施肥(NE)、在NE基础上施用缓控释肥(RNE,50%包膜氮肥,施肥量同NE)、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)共7个处理。以夏玉米浚单22为试验品种,于关键生育时期测试叶片叶绿素、冠层光合有效辐射、光合速率和叶片解剖结构,并于成熟期测定产量,分析计算肥料利用特征,研究不同施肥措施对夏玉米产量和光合生理特性的影响。结果表明:基于养分专家系统的推荐施肥(NE、RNE)处理较肥料减施状态下(NE-N、NE-P、NE-K)处理分别增产28.69%、23.23%、22.89%,较FP平均增产16.62%、11.40%。氮、磷、钾合理施用有效降低叶片胞间CO<sub>2</sub>浓度、提高净光合速率,并且对叶片解剖结构和叶绿素含量具有积极影响,光合有效辐射分量在夏玉米整个生育期内对产量的影响较大。进一步研究表明,NE处理氮、磷、钾肥料利用率平均为29.63%、15.23%、40.55%,肥料农学效率分别是11.95、22.59、24.49 kg·kg<sup>-1</sup>。综上可知,氮磷钾合理施肥显著改善夏玉米生育期叶片的光合性能,提升肥料利用率,促进干物质的合成,提高了夏玉米产量。

**关键词:**养分专家;推荐施肥;夏玉米;光合生理;肥料利用率;产量

中图分类号:S513

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)01-0107-11

doi: 10.13254/j.jare.2020.0677

### Effects of nutrient expert recommended fertilization on the physiological characteristics and yield of summer maize

WANG Dandan, LI Lantao, HAN Bengao, ZHANG Qian, SHENG Kai, WANG Yilun\*

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

**Abstract:** This study was designed to investigate the effect of the Nutrient Expert system on the physiological characteristics of summer maize with the aim of providing a reference for its popularization and application. Field experiments were conducted during the June to October 2019 growing period at sites in Hebi and Xinxiang cities in Henan Province. There were seven treatments including farmer practice (FP), local official recommended fertilization (ST), Nutrient Expert system recommend fertilization (NE), Nutrient Expert system recommend fertilization with controlled-release N fertilizer (RNE), eliminating N, P or K from the NE treatment (NE-N, NE-P and NE-K). We used Xundan 22 (maize) to study the effects of the Nutrient Expert system and evaluated the chlorophyll content, photosynthetically active radiation, photosynthetic characteristics, leaf anatomical structure, and yield in mature crops. These results were then used to determine the effect of the fertilizer, fertilization rate and fertilization site on the yield and photosynthetic characteristics of the summer maize. The results showed that fertilization improved the yield of the summer maize. Compared with NE-N, NE-P and NE-K, the Nutrient Expert system recommend fertilization (NE, RNE) increased the summer maize yields by 28.69%, 23.23%, 22.89%, respectively. Compared with the FP control, the average yield was increased by 16.62% and 11.40%, when using NE or RNE, respectively. Fertilizer

收稿日期:2020-11-18 录用日期:2020-12-29

作者简介:王丹丹(1994—),女,河南商丘人,硕士研究生,从事作物营养与高效施肥技术研究。E-mail:18437958711@163.com

\*通信作者:王宜伦 E-mail:wangyilun1@henau.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFD0301106);河南农业大学青年英才专项基金(30500427)

**Project supported:** The National Key Research and Development Program of China (2017YFD0301106); The Special Foundation for Young Scientists of Henan Agricultural University (30500427)

application recommended by the Nutrient Expert system optimized the ratio of nitrogen, phosphate and potassium fertilizer, effectively reduced intercellular CO<sub>2</sub> concentration, and increased the net photosynthetic rate of these plants which might exert a positive effect on the anatomical structure and chlorophyll content of the leaves. In addition, the effect of fraction of photosynthetically active radiation on the whole growth of summer maize was also higher in these plants. Moreover, the NE treatment increased the fertilizer use efficiency of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, and K<sub>2</sub>O, achieving 29.63%, 15.23% and 40.55%, respectively with these mixes recording an agronomic efficiency of 11.95, 22.59, 24.49 kg·kg<sup>-1</sup> respectively. In general, following the recommendations of the Nutrient Expert system significantly improved the photosynthetic characteristics of the leaves, improved the fertilizer utilization efficiency, promoted dry matter production and increased the yield of summer maize.

**Keywords:** nutrient expert; recommended fertilization; summer maize; photosynthetic physiology; fertilizer use efficiency; yield

玉米是全球第一大粮食作物,也是我国种植面积最大、总产量最高的主要粮食作物,其产业健康发展在保障国家粮食安全和满足市场需求方面发挥着主力军作用<sup>[1-2]</sup>。玉米生育周期短、需肥量大、耐肥性强,充足的养分供应是获得高产稳产的关键<sup>[3]</sup>。在保证养分充足的基础上进行合理施肥不仅能保证玉米稳产增收,还能降低环境污染风险<sup>[4-5]</sup>。玉米作为高光效C4作物,其生物量的95%左右来自光合产物<sup>[6]</sup>,研究表明玉米光合作用是作物生长、发育和产量形成的基础,可以通过提高玉米的光合作用效率提高玉米产量。因此探究光合生理特性对夏玉米产量的影响途径、掌握养分吸收动态是促进稳产高产的基础<sup>[7]</sup>。

光合作用是植物生长发育的基础,其变化必然会引起其他生理和农艺学方面的变化<sup>[8]</sup>。研究表明,夏玉米光合同化物最终以干物质的形式呈现,其干物质积累量与产量之间呈显著正相关<sup>[9]</sup>。光合作用的强弱与植株叶绿素含量紧密相关,同时叶绿素含量与植株氮营养密切相关<sup>[10]</sup>。杜成凤等<sup>[11]</sup>对玉米叶片超微结构进行研究,表明叶绿体基粒片层数与光合速率呈正相关。植物吸收性光合有效辐射分量(Fraction of photosynthetically active radiation, FPAR)是植被吸收的光合有效辐射占入射太阳辐射的比例<sup>[12]</sup>,用来表征植被冠层光能吸收强弱,也是研究作物生长模型的重要参量<sup>[13-14]</sup>。光合作用是玉米产量形成的生理基础,可以通过提高玉米光合效率促进其产量的提升<sup>[6,15]</sup>。影响植物光合效率的因素很多,如光照<sup>[16]</sup>、密度<sup>[17-18]</sup>、水分<sup>[19]</sup>等。研究表明,光照不足会导致叶片变薄变窄,还会降低幼苗新叶出生速率,从而导致籽粒产量下降<sup>[20]</sup>。这与弱光条件下,叶片能够截获的光能大幅减少、叶片净光合速率急剧下降有关<sup>[11]</sup>。研究表明,密度过大造成通风透光条件变差,功能叶片叶绿素含量、光合速率也随之降低<sup>[17]</sup>。另有研究表明水分胁迫下作物光合能力也会降低<sup>[21]</sup>。适宜的氮肥施用量是

其利用适宜密度充分发挥群体优势进行光合生产的营养物质保障,它可以通过影响穗粒数和籽粒质量来影响产量<sup>[22]</sup>。研究表明,施氮可以提高穗位叶光合性能,增密后光合能力降低,物质转化效率在高密高氮处理下均较低,最终导致产量损失<sup>[23]</sup>。干物质是籽粒产量的物质基础,产量和干物质质量呈正相关,在一定范围内,籽粒产量随干物质质量的增加而提高,因此,提高干物质的生产能力是提高玉米籽粒产量的根本途径<sup>[18]</sup>。研究表明基于养分专家系统推荐施肥(Nutrient expert,简称NE)的作物氮磷钾平衡施用可减肥不减产,实现节肥增效<sup>[4-5,24]</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>[24]</sup>,满足了当前推荐施肥需求,是一种定点适应小农户生产管理方式的推荐施肥和养管理方法。

目前,国内外关于玉米光合特性方面的研究较多<sup>[25-26]</sup>,大多集中在逆境、品种筛选及耕作方式等条件下的变化特征<sup>[19,27-28]</sup>。不同施肥条件下对夏玉米光合特性的影响以及光合特性与产量、肥料利用率的关系尚不清楚,本研究试图探讨玉米养分专家系统推荐施肥对夏玉米产量、光合特性和肥料利用率的影响,明确玉米生产中专家系统推荐施肥的增产效果和养分利用率,探究不同施肥处理的增产途径以及光合生理特性规律,旨在为指导夏玉米科学、高效与合理施肥奠定试验基础,并验证NE系统在夏玉米上的适应性。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于2019年6月至2019年10月在河南省鹤壁市农业科学院浚县科研基地(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°06'N)同步进行,供试土壤鹤壁为黏质潮土,原阳为砂质潮土。

## 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)、在NE基础上施用缓控释肥(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见表1。供试肥料分别为普通尿素(N 46.0%)、包膜尿素(N 43.2%, 释放期60~90 d)、磷酸二铵(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 为15-42-0)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12.0%, 仅于NE-N中使用)和氯化钾(K<sub>2</sub>O 60.0%)。此外,鹤壁农户习惯施肥采用复混肥料(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 为15-15-15)和尿素(225 kg·hm<sup>-2</sup>),新乡农户习惯用复混肥料(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 为30-5-5)。氮、磷、钾肥在五叶期一次性开沟施入,小区面积为57.6 m<sup>2</sup>(宽×长=7.2 m×8.0 m),三次重复,随机区组排列。供试夏玉米品种为浚单22。播种密度为67 000株·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

在夏玉米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>[29]</sup>,结果

见表2。

### 1.3.2 植株样品采集与测定

夏玉米成熟后,于各小区随机选取4株玉米,分为植株和籽粒两部分,105℃烘箱中杀青30 min后调至65℃烘干至恒质量,计算生物量。采用浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>法消煮制备待测液,用AA3流动注射分析仪、钼黄比色方法、火焰光度计法分别测定植株和籽粒全氮、全磷、全钾含量<sup>[29]</sup>。

### 1.3.3 成熟期产量测定

成熟期于各小区选取长势均匀的玉米样方10.8 m<sup>2</sup>(长×宽=3.6 m×3.0 m),自然风干后脱粒称质量,采用PM-8188-A型谷物水分测定仪测试夏玉米籽粒含水量,换算成14.0%含水量的作物产量。

### 1.3.4 植株生理指标测定

分别于夏玉米大喇叭口期、吐丝期、灌浆期(鹤壁为夏玉米播种后40、56 d和77 d;新乡为播种后39、50 d和79 d)进行生理指标的测定。

叶片光合速率测定:各小区选取最新完全展开叶(大喇叭口期)或穗位叶(吐丝期和灌浆期),于光照充足的11:00—14:00,采用LI-6800光合测定系统(LI-COR, 美国)进行净光合速率(Photosynthetic rate, *P<sub>n</sub>*)、气孔导度(Stomatal conductance, *G<sub>s</sub>*)、胞间CO<sub>2</sub>浓度(Intercellular CO<sub>2</sub> concentration, *C<sub>i</sub>*)、蒸腾速率(Transpiration rate, *T<sub>r</sub>*)等光合指标的测定。

叶片叶绿素的测定:各小区选取五片最新完全展开叶(大喇叭口期)或穗位叶(吐丝期和灌浆期),用乙

表1 夏玉米不同模式施肥量(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 1 Fertilizer application rate in different treatments of summer maize(kg·hm<sup>-2</sup>)

| 处理<br>Treatment | 施肥<br>Fertilization | 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            | 194     | 90                            | 90               | 180         | 30                            | 30               |
| ST              | 当地农技部门推荐施肥          | 210     | 75                            | 90               | 210         | 75                            | 90               |
| NE              | 养分专家系统推荐施肥          | 207     | 76                            | 75               | 207         | 74                            | 75               |
| RNE             | 养分专家系统推荐施肥中氮肥为缓控释肥  | 207     | 76                            | 75               | 207         | 74                            | 75               |
| NE-N            | NE基础上不施氮肥           | 0       | 76                            | 75               | 0           | 74                            | 75               |
| NE-P            | NE基础上不施磷肥           | 207     | 0                             | 75               | 207         | 0                             | 75               |
| NE-K            | NE基础上不施钾肥           | 207     | 76                            | 0                | 207         | 74                            | 0                |

表2 供试地土壤基础理化性质

Table 2 The physical-chemical properties of the experimental soils

| 地点<br>Site  | pH  | 有机质<br>Organic matter/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全氮<br>Total N/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 碱解氮<br>Available N/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 有效磷<br>Available P/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾<br>Available K/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
|-------------|-----|---|-------------------------------------|---|---|---|
| 鹤壁 Hebi     | 7.2 | 24.9  | 1.6                                 | 91.2                                      | 25.4                                      | 138.2                                     |
| 新乡 Xinxiang | 7.6 | 19.9  | 1.2                                 | 103.3                                     | 19.0                                      | 120.9                                     |

醇提取,分光光度计测定叶绿素含量<sup>[30]</sup>。

叶片解剖结构测定:在距离主叶脉0.5 cm左右处剪取1 cm×3 cm大小叶片,固定包埋后制成叶片横切片,甲苯胺蓝染色,在OLYMPUS BH2型植物显微成像分析系统选取3个视野清晰的位置拍摄,拍摄倍数为200倍。利用Image-Pro Plus 6.0专业图像分析软件测量叶片厚度(LT)、上表皮厚度(UET)、下表皮厚度(LET)、叶鞘间距(SS)和叶肉厚度(MT)等叶片解剖指标(图1)。

冠层光合有效辐射(PAR)测定:于光照充足、晴朗无风的11:00—14:00,采用LI-COR190SA线性光量子传感器测定玉米PAR:正测玉米上方0.10 m处光合有效辐射(PAR<sub>ci</sub>)、反测玉米上方0.20 m处光合有效辐射(PAR<sub>cr</sub>)、正测玉米根部0.05 m处光合有效辐射(PAR<sub>gi</sub>)、反测玉米根部0.10 m处光合有效辐射(PAR<sub>gr</sub>)。

#### 1.4 数据处理与分析

按照苏瑞光<sup>[31]</sup>和宋蝶等<sup>[32]</sup>方法分别计算夏玉米肥料利用率等相关指标,具体如下:

养分积累量(kg·hm<sup>-2</sup>)=植株干物质量×植株养分含量

肥料利用率=(施肥区养分积累量-无肥区养分积累量)/施肥量×100%

肥料农学效率(kg·kg<sup>-1</sup>)=(施肥区作物产量-无肥区作物产量)/施肥量

$$FPAR=[(PAR_{ci}-PAR_{cr})-(PAR_{gi}-PAR_{gr})]/PAR_{ci}^{[33]}$$

收获指数=籽粒养分积累量/地上部养分积累量×100%

采用Microsoft Excel 2016进行基础数据输入与前期处理;SPSS 22.0软件进行单因素方差(ANOVA)和Duncan新复极差法差异性显著分析,显著性水平

设定为 $\alpha=0.05$ ;Origin 8.5软件作图。

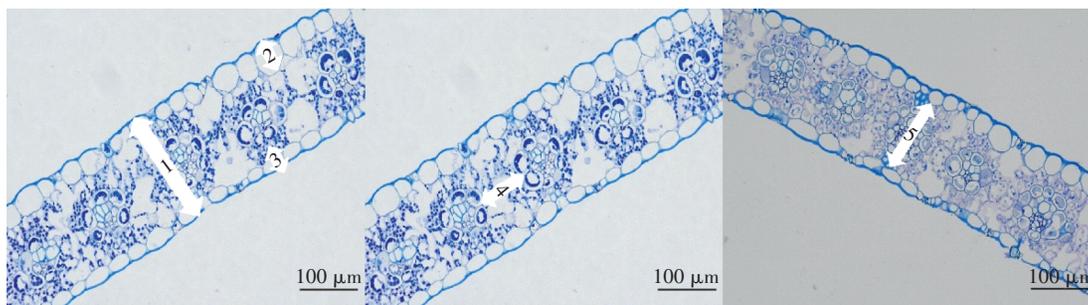
## 2 结果与分析

### 2.1 养分专家系统推荐施肥对夏玉米叶片光合作用的影响

从表3可知,净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ )在不同施肥处理和生育时期均存在显著差异。在鹤壁试验点,大喇叭口期 $P_n$ 表现为ST(31.32  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )>NE(29.37  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )>RNE(26.36  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )>FP(24.98  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ );在吐丝期NE和RNE处理 $P_n$ 别为31.03  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和32.95  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,显著高于FP处理,与ST处理无显著差异( $P>0.05$ );RNE处理 $P_n$ 在吐丝-灌浆期整体高于其他处理。 $G_s$ 在吐丝期各处理之间存在差异,其中NE和RNE处理较FP处理分别提高7.65%和13.01%,差异不显著( $P>0.05$ )。 $C_i$ 在夏玉米叶片间的变化趋势与其他光合指标整体存在相反的趋势。 $T_r$ 在各生育时期无明显差异,基于养分专家系统的推荐施肥(包括NE和RNE处理)较FP处理平均提高25.36%。在新乡试验点,光合指标变化趋势与鹤壁试验点基本一致。其中, $P_n$ 在整个生育期各处理间差异不显著, $P_n$ 、 $G_s$ 和 $T_r$ 在大喇叭口-吐丝期整体高于吐丝-灌浆期, $C_i$ 在吐丝期整体低于其他生育时期,基于养分专家系统的推荐施肥(包括NE和RNE)处理较FP、ST处理分别降低了1.76%、7.98%。

### 2.2 养分专家系统推荐施肥对夏玉米叶片叶绿素含量的影响

不同施肥处理在各生育时期叶绿素含量的变化状况见图2,结果表明,各处理叶绿素a和叶绿素b含量在大喇叭口-吐丝期呈增长趋势,在吐丝-灌浆期呈下降或缓慢增长趋势;类胡萝卜素含量全生育期内



1—叶片厚度;2—上表皮厚度;3—下表皮厚度;4—鞘间距;5—叶肉厚度。下同

1—Mesophyll thickness; 2—Upper epidermis thickness; 3—Lower epidermis thickness; 4—Sheath spacing; 5—Mesophyll thickness. The same below

图1 夏玉米叶片解剖结构

Figure 1 Anatomical structure of summer maize leaves

表3 不同施肥模式下夏玉米光合特性比较

Table 3 Comparison of photosynthetic characteristics of summer maize under different fertilization modes

| 生育时期<br>Growth stage          | 处理<br>Treatment | 鹤壁 Hebi   |  |   |   | 新乡 Xinxiang   |  |   |   |
|-------------------------------|-----------------|---|--|---|---|---|--|---|---|
|                               |                 | $P_n/$<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | $G_s/$<br>( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | $C_i/$<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) | $T_t/$<br>( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | $P_n/$<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | $G_s/$<br>( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | $C_i/$<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) | $T_t/$<br>( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |
| 大喇叭<br>口期<br>Opening<br>stage | NE-N            | 14.74±0.62c   | 0.07±0.01b   | 196.81±19.65a                                     | 1.19±0.03b  | 22.62±1.49a   | 0.18±0.02ab  | 298.45±22.83ab                                    | 1.90±0.11c  |
|                               | NE-P            | 16.21±0.78c   | 0.08±0.01b   | 198.47±21.83a                                     | 1.03±0.11b  | 23.67±2.60a   | 0.17±0.01b   | 319.72±35.17a                                     | 2.01±0.22c  |
|                               | NE-K            | 12.31±0.35c   | 0.08±0.01b   | 223.00±24.53a                                     | 1.16±0.03b  | 22.70±1.50a   | 0.18±0.02ab  | 305.90±23.65a                                     | 2.00±0.12c  |
|                               | FP              | 24.98±1.75b   | 0.16±0.02a   | 198.28±20.81a                                     | 2.21±0.09a  | 25.71±2.83a   | 0.18±0.02ab  | 279.66±20.76ab                                    | 2.10±0.23bc   |
|                               | ST              | 31.32±2.44a   | 0.18±0.02a   | 193.36±21.27a                                     | 2.14±0.24a  | 26.47±1.91a   | 0.17±0.02b   | 242.75±26.70b                                     | 2.56±0.18ab   |
|                               | NE              | 29.37±3.23ab  | 0.18±0.02a   | 190.68±19.97a                                     | 2.28±0.15a  | 27.23±2.00a   | 0.21±0.02a   | 185.07±10.36c                                     | 2.86±0.31a  |
| 吐丝期<br>Silking<br>stage       | RNE             | 26.36±1.90b   | 0.16±0.02a   | 196.78±21.65a                                     | 1.97±0.22a  | 26.18±2.88a   | 0.20±0.01ab  | 270.57±29.76ab                                    | 2.5±0.27ab  |
|                               | NE-N            | 25.91±2.85bc  | 0.10±0.01c   | 161.54±7.77a                                      | 2.19±0.24b  | 22.20±2.44ab  | 0.10±0.01c   | 160.70±7.68b                                      | 2.58±0.18a  |
|                               | NE-P            | 20.45±1.25de  | 0.14±0.02b   | 157.22±17.29ab                                    | 1.93±0.11b  | 20.23±2.23b   | 0.11±0.01bc  | 151.96±16.72bc                                    | 2.36±0.26a  |
|                               | NE-K            | 17.13±1.88e   | 0.09±0.01c   | 166.42±18.31a                                     | 1.88±0.21b  | 23.69±1.61ab  | 0.10±0.01c   | 197.12±11.68a                                     | 2.46±0.27a  |
|                               | FP              | 25.22±1.77cd  | 0.15±0.01ab  | 127.52±4.03b                                      | 1.92±0.21b  | 22.33±2.46ab  | 0.13±0.01ab  | 134.36±14.78bc                                    | 2.59±0.18a  |
|                               | ST              | 30.08±3.31abc   | 0.17±0.02a   | 145.66±16.02ab                                    | 3.35±0.27a  | 23.45±1.58ab  | 0.13±0.01ab  | 143.43±5.78bc                                     | 2.69±0.30a  |
| 灌浆期<br>Filling<br>stage       | NE              | 31.03±3.41ab  | 0.16±0.01ab  | 131.15±9.43b                                      | 3.11±0.34a  | 25.45±2.80a   | 0.14±0.01a   | 126.75±13.94c                                     | 2.75±0.30a  |
|                               | RNE             | 32.95±2.62a   | 0.17±0.02a   | 127.65±14.04b                                     | 2.96±0.23a  | 22.64±1.49ab  | 0.13±0.01ab  | 137.23±15.10bc                                    | 2.74±0.30a  |
|                               | NE-N            | 19.21±2.11c   | 0.08±0.01b   | 182.70±20.10a                                     | 1.59±0.07c  | 22.45±2.47a   | 0.15±0.02a   | 243.35±16.77ab                                    | 2.17±0.14b  |
|                               | NE-P            | 17.91±0.97cd  | 0.10±0.01b   | 181.97±20.02a                                     | 1.39±0.15c  | 22.29±2.45a   | 0.15±0.01a   | 252.62±27.79a                                     | 2.15±0.24b  |
|                               | NE-K            | 14.24±1.57d   | 0.08±0.01b   | 200.37±12.04a                                     | 1.45±0.06c  | 23.10±1.54a   | 0.15±0.02a   | 262.39±8.86a                                      | 2.18±0.14b  |
|                               | FP              | 25.08±1.76b   | 0.16±0.01a   | 169.98±8.70a                                      | 2.07±0.13b  | 24.36±1.68a   | 0.16±0.02a   | 221.54±24.37ab                                    | 2.30±0.25b  |
|                               | ST              | 30.82±3.39a   | 0.17±0.02a   | 174.28±19.17a                                     | 2.62±0.19a  | 25.27±1.78a   | 0.15±0.02a   | 203.02±22.33bc                                    | 2.61±0.29ab   |
|                               | NE              | 30.03±2.30ab  | 0.17±0.02a   | 166.87±18.36a                                     | 2.62±0.29a  | 26.52±2.92a   | 0.18±0.02a   | 161.74±7.79c                                      | 2.81±0.21a  |
|                               | RNE             | 29.00±3.19ab  | 0.17±0.02a   | 169.13±18.60a                                     | 2.36±0.26ab   | 24.77±1.72a   | 0.17±0.01a   | 217.23±23.90ab                                    | 2.59±0.29ab   |

注:  $P_n$ —净光合速率;  $G_s$ —气孔导度;  $C_i$ —胞间  $\text{CO}_2$  浓度;  $T_t$ —蒸腾速率。同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

Note:  $P_n$ —Photosynthetic rate;  $G_s$ —Stomatal conductance;  $C_i$ —Intercellular  $\text{CO}_2$  concentration;  $T_t$ —Transpiration rate. The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at  $P<0.05$ . The same below.

变化不大,整体呈现下降趋势。夏玉米叶绿素含量在吐丝期含量达到最大值,两试验区 NE、RNE 较 FP 处理平均增加 3.43%、2.38% (鹤壁) 和 5.60%、2.69% (新乡)。

### 2.3 养分专家系统推荐施肥对夏玉米叶片解剖结构的影响

图3为夏玉米吐丝期各施肥处理下叶片解剖结构,正常施肥状态下(FP、ST、NE、RNE)的叶片厚度(LT)相对较大、叶肉细胞排列整齐(图3a、3b、3c、3d),肥料减施状态下(NE-N、NE-P、NE-K)的叶片细胞间隙变大且排列疏松(图3e、3f)。从大喇叭口期到灌浆期,夏玉米叶片解剖结构前期变化不大,后期上表皮厚度(LET)、下表皮厚度(LT)和叶肉厚度(MT)整体呈现降低的趋势(表4)。在吐丝期对鹤壁和新乡两试验区的叶片解剖结构进行分析,正常施肥与肥料减施处理之间叶片解剖结构差异显著( $P<0.05$ ),LT指标基于养分系统的推荐施肥(NE、RNE)处理较FP、ST处理平

均提高 6.87%、4.24%; UET、LET 和鞘间距(SS)指标各施肥处理之间并无显著差异( $P>0.05$ ),基于养分专家系统的推荐施肥整体呈较高水平;NE、RNE 处理 MT 指标较 FP 处理平均提高 10.06%、3.83%,与 ST 处理无显著差异( $P>0.05$ )。

### 2.4 养分专家系统推荐施肥对夏玉米冠层光合有效辐射的影响

由图4可知,施肥显著提高夏玉米冠层吸收光合有效辐射分量(FPAR),不同施肥处理之间存在显著差异( $P<0.05$ )。从大喇叭口期到灌浆期不同施肥处理 FPAR 呈现先缓慢增加后降低的趋势。在吐丝期夏玉米冠层结构逐渐密闭,FPAR 达到最大值;在鹤壁试验区,施肥状态下各处理之间无显著差异( $P>0.05$ );在新乡试验区,基于养分专家系统的推荐施肥处理(NE、RNE)较 FP 处理提高 12.96%、6.28%,与 ST 处理无显著差异( $P>0.05$ )。在灌浆期,植株由营养生长转入生殖生长,FPAR 逐渐降低。进一步研究表明,

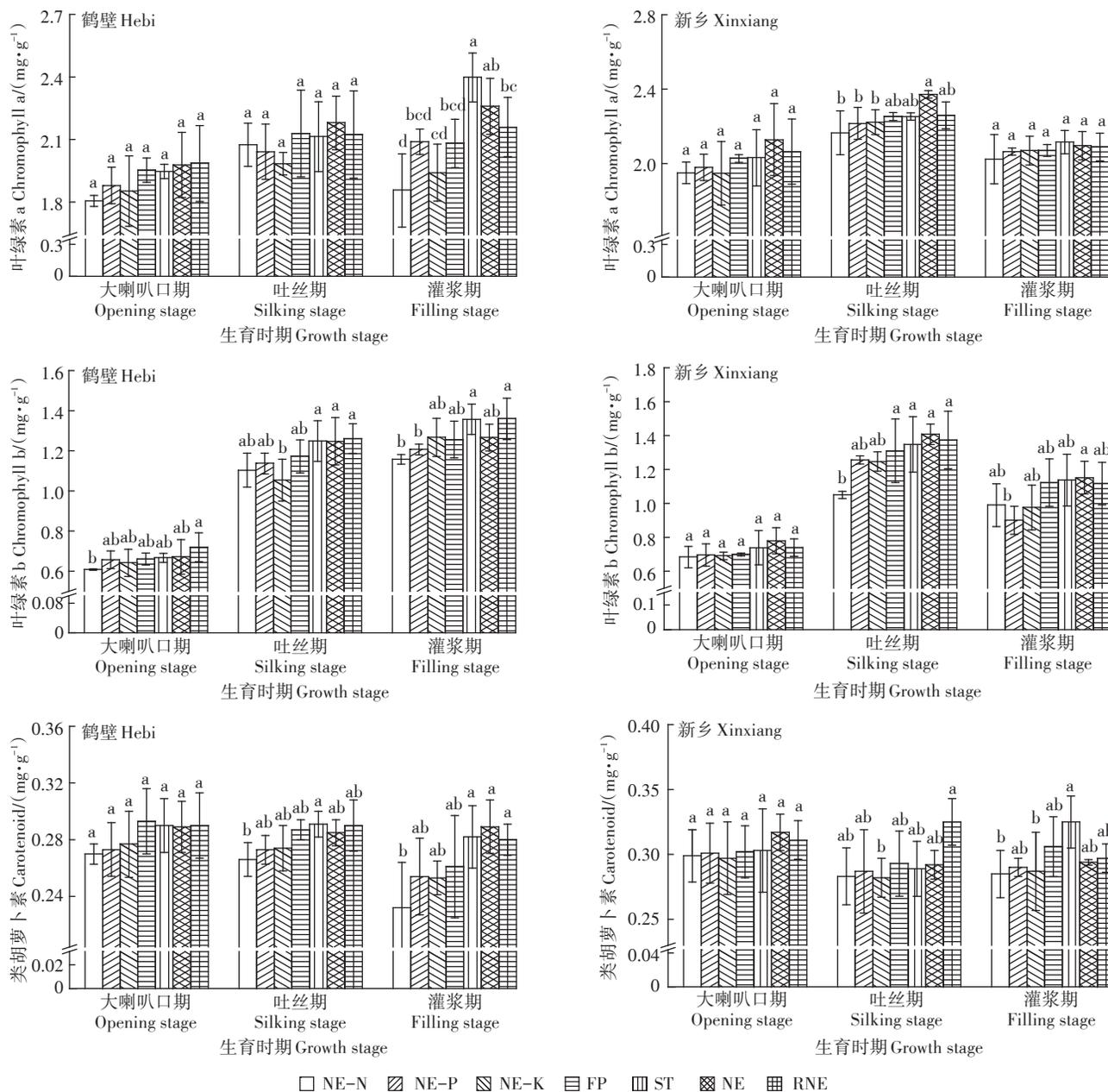


图2 不同施肥模式对夏玉米各生育时期叶绿素的影响

Figure 2 Effects of different fertilization patterns on chlorophyll growth in summer maize

不施磷、钾肥夏玉米 *FPAR* 值变化幅度相对较大,表明适当增加磷、钾肥施用量,对改善群体光合有效辐射起到促进作用,这一点在吐丝期表现得尤为明显。

### 2.5 养分专家系统推荐施肥对夏玉米产量的影响

由图5可知,与磷钾配施(NE-N)、氮钾配施(NE-P)、氮磷配施(NE-K)处理相比,氮磷钾合理配施显著增加夏玉米产量( $P < 0.05$ )。其中NE、ST处理产量效益较好,NE与RNE处理差异不显著,与FP处理差异显著( $P < 0.05$ )。与NE-N、NE-P、NE-K处理相比,NE处理分别增产28.70%~34.56%、23.08%~

29.02%、19.32%~32.18%。在鹤壁试验点,NE、RNE较FP处理分别增产19.24%和11.33%,在新乡试验点分别增产14.00%和11.47%。ST与RNE处理差异不显著( $P > 0.05$ ),交互作用研究表明,试验地点(*S*)和处理(*T*)对作物产量影响均达到极显著水平( $P < 0.001$ ),两者交互( $S \times T$ )作用对产量的影响未达到显著水平( $P > 0.05$ )。

### 2.6 夏玉米产量和生理特性的相关性分析

由表5可知,在整个生育期内夏玉米产量与 *FPAR* 呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与  $C_i$  呈显著负相关

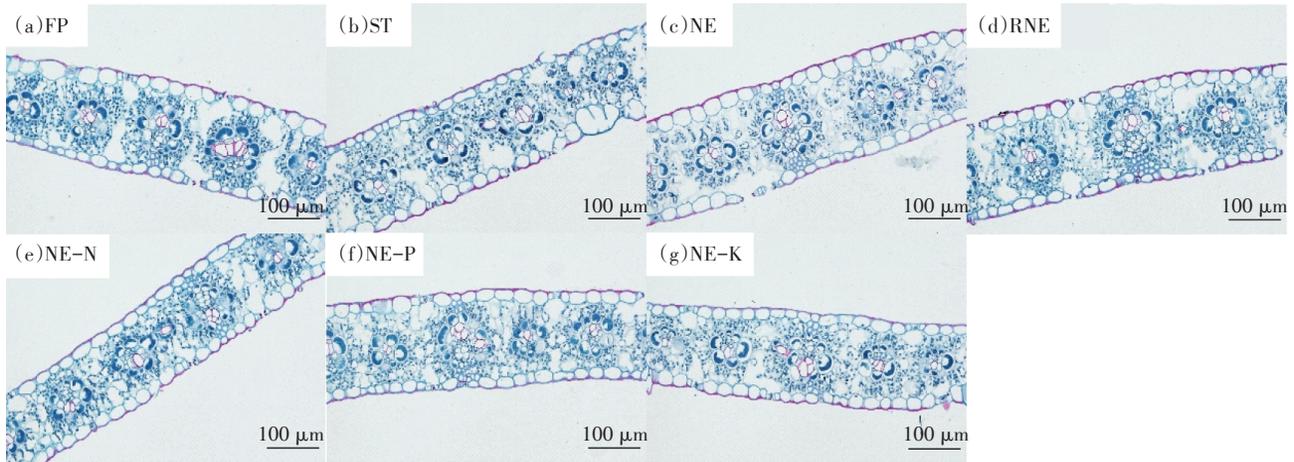


图3 不同施肥处理下夏玉米吐丝期叶片石蜡横切片比较

Figure 3 Cross section comparison of leaf paraffin sections in different fertilization treatments at the silking stage

表4 不同施肥模式对夏玉米各生育时期叶片解剖结构的影响(μm)

Table 4 Effects of different fertilization patterns on leaf anatomy in summer maize growth period (μm)

| 生育时期<br>Growth stage   | 处理<br>Treatment | 鹤壁 Hebi        |               |              |              |                | 新乡 Xinxiang    |              |              |              |                |
|------------------------|-----------------|----------------|---------------|--------------|--------------|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
|                        |                 | LT             | UET           | LET          | SS           | MT             | LT             | UET          | LET          | SS           | MT             |
| 大喇叭口期<br>Opening stage | NE-N            | 130.25±11.87d  | 19.58±1.29c   | 20.04±1.99b  | 34.76±3.59c  | 89.05±5.64d    | 148.74±4.83ab  | 19.22±1.95c  | 21.42±2.51ab | 40.10±4.11a  | 102.59±8.08a   |
|                        | NE-P            | 142.68±9.68cd  | 21.14±1.66c   | 21.82±2.58ab | 41.83±1.50b  | 106.02±1.41c   | 148.47±4.56ab  | 19.29±0.41c  | 20.39±2.08b  | 40.88±3.37a  | 104.25±11.40a  |
|                        | NE-K            | 147.46±6.02bc  | 24.46±0.89b   | 20.05±2.70b  | 40.61±4.99bc | 104.12±4.15c   | 136.60±14.99b  | 20.55±1.26bc | 19.27±1.77b  | 39.15±4.15a  | 101.10±4.97a   |
|                        | FP              | 146.34±7.70bc  | 25.74±2.28b   | 22.56±3.12ab | 43.14±1.03ab | 105.72±8.56c   | 149.85±9.54ab  | 23.78±4.48ab | 21.00±1.76ab | 41.95±5.35a  | 106.30±4.92a   |
|                        | ST              | 159.02±2.19ab  | 30.95±0.06a   | 22.38±1.28ab | 43.56±1.75ab | 111.06±1.04bc  | 155.41±6.32a   | 25.83±0.42a  | 22.76±2.90ab | 43.62±1.52a  | 111.18±8.69a   |
|                        | NE              | 171.54±7.71a   | 29.60±0.61a   | 25.63±0.32a  | 49.02±5.28a  | 123.61±2.25a   | 155.71±4.46a   | 24.11±1.54ab | 24.77±1.85a  | 42.12±3.82a  | 114.48±6.01a   |
|                        | RNE             | 164.95±4.96a   | 25.75±2.34b   | 25.74±0.57a  | 43.27±2.55ab | 119.83±6.84ab  | 150.73±7.03ab  | 23.54±0.54ab | 22.19±1.76ab | 43.69±1.73a  | 109.57±10.75a  |
| 吐丝期<br>Silking stage   | NE-N            | 134.43±2.61e   | 19.36±1.72c   | 18.65±1.03c  | 33.33±1.23c  | 87.46±4.89d    | 149.61±8.50ab  | 19.02±0.91c  | 21.15±1.55ab | 41.81±1.64ab | 103.01±3.61ab  |
|                        | NE-P            | 142.62±3.03de  | 19.82±1.46c   | 20.19±1.36bc | 42.44±2.83ab | 106.6±1.73bc   | 148.71±10.23ab | 18.97±1.42c  | 20.04±2.59b  | 40.74±0.98ab | 106.20±10.82ab |
|                        | NE-K            | 144.08±4.32de  | 23.65±1.41b   | 20.41±2.40bc | 40.94±0.57b  | 101.31±3.31c   | 141.09±5.05b   | 19.96±0.79bc | 21.18±1.16ab | 40.39±2.97b  | 94.67±10.08b   |
|                        | FP              | 151.33±4.20cd  | 23.35±2.16b   | 23.14±1.49ab | 42.69±1.87ab | 107.51±9.10bc  | 150.53±9.30ab  | 22.51±1.03ab | 22.38±1.34ab | 41.16±2.12ab | 108.54±11.18ab |
|                        | ST              | 156.71±1.26bc  | 28.29±1.67a   | 23.96±1.36a  | 44.19±3.56ab | 115.62±11.90ab | 152.74±4.97ab  | 22.84±1.11a  | 22.61±2.20ab | 43.45±2.95ab | 110.17±4.43ab  |
|                        | NE              | 167.55±12.69a  | 28.44±1.33a   | 24.68±1.85a  | 47.11±3.19a  | 125.76±4.95a   | 159.27±3.54a   | 22.43±2.55ab | 23.81±1.22a  | 43.83±1.54ab | 111.95±4.83a   |
|                        | RNE             | 164.70±4.72ab  | 25.20±2.09b   | 25.48±1.94a  | 45.02±3.68ab | 117.16±2.63ab  | 153.73±12.45ab | 21.68±1.17ab | 22.07±2.13ab | 44.48±0.28a  | 107.10±10.05ab |
| 灌浆期<br>Filling stage   | NE-N            | 115.86±6.52bc  | 15.48±1.03bc  | 13.96±0.64b  | 30.74±0.18a  | 81.75±2.09ab   | 146.05±1.86b   | 17.30±0.63bc | 18.20±1.66ab | 40.07±0.93b  | 101.79±1.10b   |
|                        | NE-P            | 118.56±4.92bc  | 14.62±0.28c   | 14.03±0.66b  | 32.01±3.47a  | 82.52±3.36ab   | 149.57±4.14ab  | 19.01±1.20ab | 17.58±0.85b  | 40.26±2.09b  | 106.47±4.99ab  |
|                        | NE-K            | 114.69±2.28c   | 15.87±1.95abc | 13.23±0.68b  | 31.18±1.86a  | 80.32±2.08b    | 144.27±3.38b   | 16.67±0.15c  | 18.26±0.79ab | 38.86±1.26b  | 102.17±3.47b   |
|                        | FP              | 119.54±4.17abc | 17.43±1.16ab  | 15.36±1.05a  | 32.66±3.39a  | 82.32±2.63ab   | 149.6±0.37ab   | 18.78±0.57ab | 18.84±0.36ab | 40.48±2.36b  | 106.12±5.20ab  |
|                        | ST              | 123.77±7.75abc | 18.27±2.24a   | 15.42±0.82a  | 34.17±3.00a  | 85.46±5.88ab   | 157.88±2.00a   | 18.74±1.32ab | 19.08±0.40ab | 41.10±1.62ab | 112.71±1.79a   |
|                        | NE              | 124.81±1.93ab  | 17.05±1.00abc | 16.05±0.27a  | 34.65±1.81a  | 86.64±0.87a    | 154.81±14.63ab | 19.48±1.31a  | 19.32±0.47ab | 41.32±0.41ab | 108.11±7.84ab  |
|                        | RNE             | 128.65±5.03a   | 16.92±0.19abc | 16.58±0.21a  | 34.36±0.36a  | 87.68±3.08a    | 159.41±3.46a   | 18.62±0.82ab | 19.84±1.04a  | 43.63±0.79a  | 114.18±2.51a   |

注:LT—叶片厚度;UET—上表皮厚度;LET—下表皮厚度;SS—叶鞘间距;MT—叶肉厚度。下同。

Note: LT—Leaf thickness; UET—Upper epidermis thickness; LET—Lower epidermis thickness; SS—Sheath spacing; MT—Mesophyll thickness. The same below.

( $P<0.05$ )。在大喇叭口-吐丝期,产量与叶片解剖结构参数(LT、UET、LRT、SS、MT)显著相关( $P<0.05$ ),在灌浆期未达到显著水平。叶绿素a(CHa)和叶绿素b(CHb)在灌浆期与产量极显著相关, $P_n$ 和 $G_s$ 在吐丝期

与产量极显著相关( $P<0.01$ )。进一步对夏玉米产量和生理特性进行灰色关联分析(表5),关联度越大表明该指标与产量的关系越密切。结果表明,关联序与相关性分析结果整体保持一致,UET、FPAR在全生育

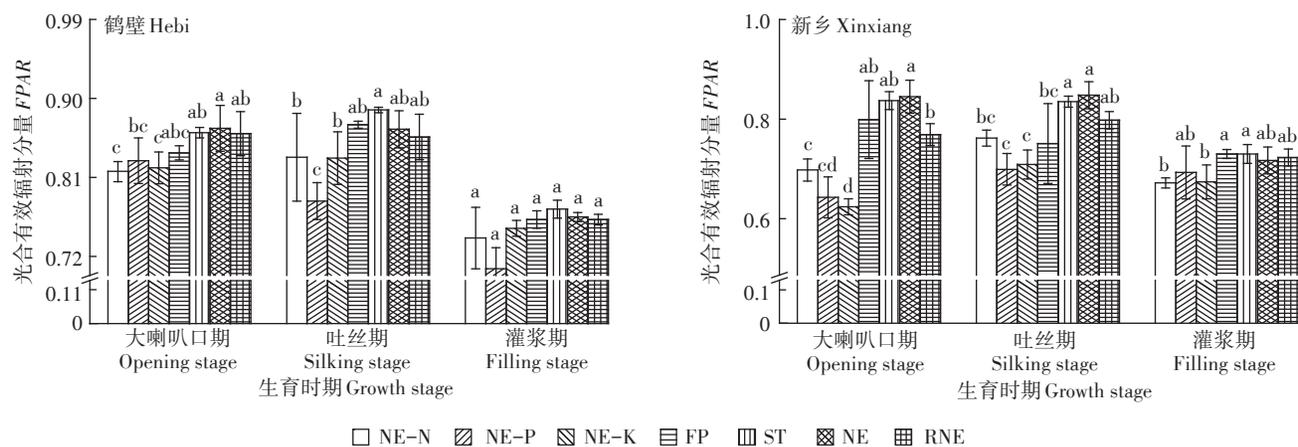


图4 不同施肥模式下夏玉米冠层光合有效辐射的变化

Figure 4 Changes of canopy photosynthetically active radiation in summer maize under different fertilization patterns

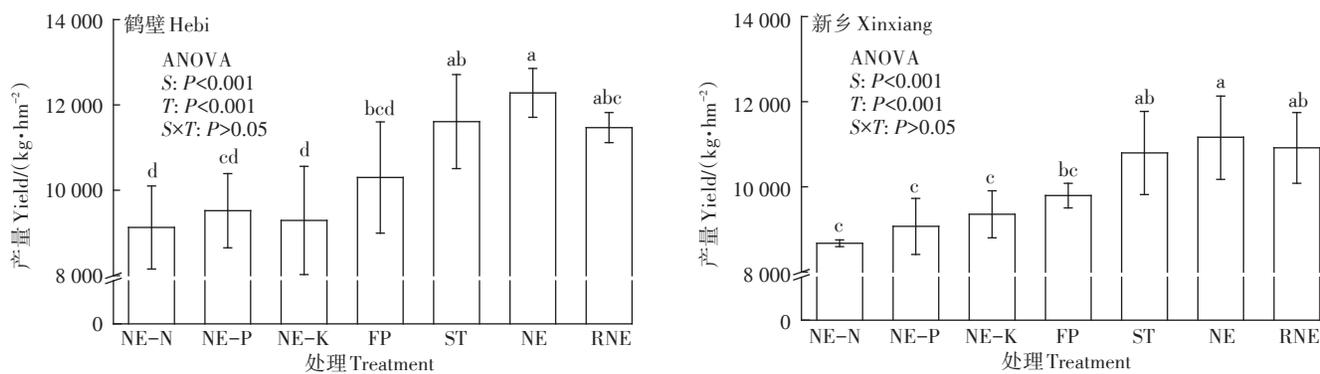


图5 不同施肥模式下夏玉米产量

Figure 5 Yields of summer maize under different fertilization patterns

表5 产量与生理特性相关分析及灰色关联分析

Table 5 Correlation analysis and grey relation analysis of yield and physiological characteristics

| 生理指标<br>Physiological<br>indicator | 大喇叭口期 Opening stgse                |                                   |                            | 吐丝期 Silking stage                  |                                   |                            | 灌浆期 Filling stage                  |                                   |                            |
|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
|                                    | 相关系数<br>Correlation<br>coefficient | 关联系数<br>Connection<br>coefficient | 关联序<br>Connection<br>order | 相关系数<br>Correlation<br>coefficient | 关联系数<br>Connection<br>coefficient | 关联序<br>Connection<br>order | 相关系数<br>Correlation<br>coefficient | 关联系数<br>Connection<br>coefficient | 关联序<br>Connection<br>order |
| CHa                                | 0.05                               | 0.39                              | 7                          | -0.19                              | 0.35                              | 10                         | 0.72**                             | 0.47                              | 2                          |
| CHb                                | -0.08                              | 0.34                              | 9                          | 0.20                               | 0.30                              | 12                         | 0.87**                             | 0.54                              | 1                          |
| CA                                 | -0.20                              | 0.38                              | 8                          | 0.10                               | 0.41                              | 8                          | -0.03                              | 0.25                              | 9                          |
| LT                                 | 0.66*                              | 0.47                              | 6                          | 0.64*                              | 0.45                              | 5                          | -0.46                              | 0.20                              | 11                         |
| UET                                | 0.91**                             | 0.55                              | 1                          | 0.91**                             | 0.60                              | 1                          | -0.04                              | 0.28                              | 7                          |
| LRT                                | 0.69**                             | 0.54                              | 2                          | 0.72**                             | 0.44                              | 6                          | -0.33                              | 0.19                              | 12                         |
| SS                                 | 0.68**                             | 0.49                              | 4                          | 0.57*                              | 0.46                              | 4                          | -0.43                              | 0.20                              | 10                         |
| MT                                 | 0.65*                              | 0.49                              | 3                          | 0.71**                             | 0.50                              | 3                          | -0.48                              | 0.19                              | 13                         |
| FPAR                               | 0.79**                             | 0.48                              | 5                          | 0.81**                             | 0.53                              | 2                          | 0.87**                             | 0.45                              | 3                          |
| P <sub>n</sub>                     | 0.48                               | 0.33                              | 10                         | 0.74**                             | 0.40                              | 9                          | 0.62*                              | 0.33                              | 5                          |
| G <sub>s</sub>                     | 0.07                               | 0.23                              | 13                         | 0.86**                             | 0.42                              | 7                          | 0.35                               | 0.37                              | 4                          |
| C <sub>i</sub>                     | -0.76**                            | 0.25                              | 12                         | -0.56*                             | 0.27                              | 13                         | -0.79**                            | 0.28                              | 8                          |
| T <sub>r</sub>                     | 0.18                               | 0.27                              | 11                         | 0.48                               | 0.34                              | 11                         | 0.32                               | 0.28                              | 6                          |

注: CHa—叶绿素 a; CHb—叶绿素 b; CA—类胡萝卜素。\* P<0.05; \*\* P<0.01。

Note: CHa—Chlorophyll a; CHb—Chlorophyll b; CA—Carotenoids. \* P<0.05; \*\* P<0.01.

期内都表现出较强的关联度,在灌浆期各指标相关性表现为  $CHb > CHa > FPAR > G_s > P_n$ ,这5种指标对产量的影响较大。

### 2.7 养分专家系统推荐施肥对夏玉米肥料利用率的影响

由表6可知,在鹤壁试验区,NE处理氮、磷、钾肥料利用率分别是26.16%、16.63%、50.95%,与NE处理相比,RNE表现出更高的肥料利用率;在新乡试验区,NE处理氮、磷、钾肥料利用率分别是33.09%、13.83%、30.14%,RNE与NE处理相比,二者差异不明显。夏玉米氮、磷、钾肥料农学效率整体表现出与肥料利用率一致的趋势,其中新乡试验区氮肥农学效率明显低于鹤壁试验区。

## 3 讨论

氮磷钾合理施肥可显著提高夏玉米产量,基于养分专家系统推荐施肥(NE、RNE)在鹤壁、新乡试验区较当地农民习惯施肥(FP)平均增产16.62%、11.40%,这与王宜伦等<sup>[4]</sup>在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。与NE-N、NE-P、NE-K处理相比,NE处理分别增产28.70%~34.56%、23.08%~29.02%、19.32%~32.18%,NE与RNE处差异不显著,考虑到缓控释肥能提高中后期土壤养分含量<sup>[34]</sup>,可能由于包膜尿素释放期过长(60~90 d),而玉米生育期短,包膜尿素释放期和释放速率不能够满足玉米整个生育期对氮素的需求。交互作用表明,试验地点和处理对作物产量的影响均达到极显著水平( $P < 0.001$ ),两者交互作用对产量的影响未达到显著水平( $P > 0.05$ ),这与李岚涛等<sup>[35]</sup>在玉米上的研究基本一致。NE处理优化了氮磷钾的用量,较ST处理在降低16.67%钾肥的同时并未造成减产,这与试验地区土壤钾肥较为丰富有关,也进一步验证合理施肥的重要性。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,玉米作为高光效C4植物,其干物质的形成主要通过光合作用来实现,提高玉米的光合效率将有助于玉米产量的提升<sup>[6]</sup>。

玉米产量受光合指标、叶绿素含量、太阳光辐射等生理特性影响显著。刘永忠等<sup>[36]</sup>研究发现,产量与净光合速率、气孔导度、蒸腾速率之间均呈正相关,本试验中夏玉米在大喇叭口-灌浆期得到相同的结果。NE较ST处理相比,降低施肥量并未显著降低叶片中叶绿素含量,李志宏等<sup>[10]</sup>的研究表明叶绿素含量与植株氮营养有密切关系,叶绿素含量又与光合作用紧密相关,这也强调了合理施肥的重要性。FPAR值可以作为评估产量的重要参数<sup>[37]</sup>。本研究表明,大喇叭口-灌浆期内夏玉米FPAR值与产量呈现极显著正相关( $P < 0.01$ ),在吐丝期夏玉米冠层结构逐渐密闭,FPAR达到最大值。基于养分专家系统的推荐施肥处理(NE、RNE)与ST处理无显著差异( $P > 0.05$ ),同样的结论在贺佳等<sup>[33]</sup>对冬小麦的遥感监测中也得到验证,其认为适量提高氮磷供应水平能有效显著改善冬小麦群体FPAR值( $P < 0.05$ )。叶片是玉米进行光合作用的主要器官,是截获光能的物质载体,叶面积大小及光合作用强弱对玉米生长发育及产量有重要影响<sup>[8]</sup>。本研究结果证实,在大喇叭口-吐丝期,产量与叶片解剖结构参数(LT、UET、LRT、SS、MT)显著相关( $P < 0.05$ )。在吐丝期NE处理的叶肉厚度显著大于其他施肥处理,从而造成光合作用上的差异。叶片一定的厚度可保证充足的叶绿素含量,延长有效光合作用时间,提高玉米吐丝后群体光合速率,能够显著提高产量<sup>[16]</sup>。

光合生理特性变化趋势影响夏玉米的产量,提高肥料利用率是科学施肥的重要目标,农学效率和肥料利用率是衡量科学施肥的主要参考指标<sup>[38]</sup>。张福锁等<sup>[39]</sup>对全国粮食主产区开展的1333个田间试验结果显示,玉米氮、磷、钾肥料利用率分别为26.10%、11.00%、31.90%,肥料农学效率分别是9.80、7.50、5.70  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。本试验中,NE处理氮、磷、钾肥料利用率分别是26.16%~33.09%、13.83%~18.37%、30.14%~50.95%,肥料农学效率分别是8.58~15.31、20.38~24.80、15.95~33.02  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,整体高于全国平均水平。

## 4 结论

(1)氮、磷、钾肥合理配施可有效提高夏玉米产量,基于养分专家系统推荐施肥处理及在此基础上施用缓控释肥处理的夏玉米产量与当地农技部门推荐

表6 养分专家系统推荐施肥对夏玉米肥料效率指标的影响

Table 6 Effects of nutrient expert system recommended fertilization on fertilizer efficiency index of summer maize

| 地点<br>Site     | 处理<br>Treatment | 肥料利用率<br>Fertilizer utilization efficiency/% |                               |                  | 农学效率<br>Agronomic efficiency/<br>( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) |                               |                  |
|----------------|-----------------|--|-------------------------------|------------------|---|-------------------------------|------------------|
|                |                 | 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              | 26.16  | 16.63                         | 50.95            | 14.73   | 23.15                         | 33.02            |
|                | RNE             | 27.71  | 20.99                         | 53.47            | 15.31   | 23.05                         | 15.95            |
| 新乡<br>Xinxiang | NE              | 33.09  | 13.83                         | 30.14            | 8.58  | 20.38                         | 22.97            |
|                | RNE             | 29.35  | 18.37                         | 30.71            | 9.99  | 24.80                         | 23.51            |

施肥处理无显著差异,较当地农民习惯施肥处理分别增产16.62%和11.40%。

(2)氮、磷、钾合理施用可有效降低叶片胞间CO<sub>2</sub>浓度、提高净光合速率,对叶片解剖结构和叶绿素含量具有积极影响,光合有效辐射分量在夏玉米整个生育期内对产量的影响较大。

(3)养分专家系统推荐施肥处理氮、磷、钾平均肥料利用率分别为29.63%、15.23%、40.55%,农学效率分别为11.95、22.59、24.49 kg·kg<sup>-1</sup>,整体高于全国平均水平。

#### 参考文献:

- [1] LOBELL D B, ROBERTS M J, SCHLENKER W, et al. Greater sensitivity to drought accompanies maize yield increase in the U. S. Midwest [J]. *Science*, 2014, 344(6183):516-519.
- [2] 南纪琴,肖俊夫,刘战东.黄淮海夏玉米高产栽培技术研究[J].中国农学通报,2010,26(21):106-110. NAN J Q, XIAO J F, LIU Z D. Study on the technologies of maize high-yield cultivation in Yellow Huai Hai[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(21):106-110.
- [3] 赵兰坡,王鸿斌,刘会青,等.松辽平原玉米带黑土肥力退化机理研究[J].土壤学报,2006,43(1):79-84. ZHAO L P, WANG H B, LIU H Q, et al. Mechanism of fertility degradation of black soil in corn belt of Songliao Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1):79-84.
- [4] 王宜伦,自由路,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. WANG Y L, BAI Y L, WANG L, et al. Effects of recommended fertilization based on nutrient expert in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(22):4483-4492.
- [5] 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.
- [6] 王斐,王克雄,关耀兵,等.不同品种春玉米光合特性及产量效应分析[J].山西农业科学,2019,47(10):1691-1694. WANG F, WANG K X, GUAN Y B, et al. Analysis on photosynthetic characteristics and yield effect of different spring maize varieties[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(10):1691-1694.
- [7] 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.
- [8] AMINIAN R, MOHAMMADI S, HOSHMAND S, et al. Chromosomal analysis of photosynthesis rate and stomatal conductance and their relationships with grain yield in wheat (*Triticum aestivum* L.) under water-stressed and well-watered conditions[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2010, 33(3):755-764.
- [9] 曹胜彪,张吉旺,董树亭,等.施氮量和种植密度对高产夏玉米产量和氮素利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(6):1343-1353. CAO S B, ZHANG J W, DONG S T, et al. Effects of nitrogen rate and planting density on grain yield and nitrogen utilization efficiency of high yield summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(6):1343-1353.
- [10] 李志宏,刘宏斌,张云贵.叶绿素仪在氮肥推荐中的应用研究进展[J].植物营养与肥料学报,2006,12(1):125-132. LI Z H, LIU H B, ZHANG Y G. A review on chlorophyll meter application on nitrogen fertilizer recommendation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(1):125-132.
- [11] 杜成凤,李潮海,刘天学,等.遮荫对两个基因型玉米叶片解剖结构及光合特性的影响[J].生态学报,2011,31(21):6633-6640. DU C F, LI C H, LIU T X, et al. Response of anatomical structure and photosynthetic characteristics to low light stress in leaves of different maize genotypes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(21):6633-6640.
- [12] 陈雪洋,蒙继华,吴炳方,等.基于HJ-1 CCD的夏玉米FPAR遥感监测模型[J].农业工程学报,2010,26(增刊1):241-245. CHEN X Y, MENG J H, WU B F, et al. Monitoring corn FPAR based on HJ-1 CCD[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(Supp 1):241-245.
- [13] 郑健,蔡焕杰,王健,等.日光温室室内光合有效辐射基本特征分析[J].农业机械学报,2009,40(12):164-168,176. ZHENG J, CAI H J, WANG J, et al. Features of photosynthetic active radiation (PAR) in greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(12):164-168, 176.
- [14] 冯伟,朱艳,姚霞,等.小麦叶片色素含量的高光谱监测[J].应用生态学报,2008,19(5):992-999. FENG W, ZHU Y, YAO X, et al. Monitoring of wheat leaf pigment concentration with hyper-spectral remote sensing[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5):992-999.
- [15] XU Z, ZHOU G, HAN G, et al. Photosynthetic potential and its association with lipid peroxidation in response to high temperature at different leaf ages in maize[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2010, 30(1), 41-50.
- [16] 沈秀瑛,戴俊英,胡安畅,等.玉米群体冠层特征与光截获及产量关系的研究[J].作物学报,1993,19(3):246-251. SHEN X Y, DAI J Y, HU A C, et al. Studies on relationship among character of canopy light interception and yield in maize populations (*Zea mays* L.) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1993, 19(3):246-251.
- [17] 陈传永,侯海鹏,李强,等.种植密度对不同玉米品种叶片光合特性与碳、氮变化的影响[J].作物学报,2010,36(5):871-878. CHEN C Y, HOU H P, LI Q, et al. Effects of planting density on photosynthetic characteristics and changes of carbon and nitrogen in leaf of different corn hybrids[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(5):871-878.
- [18] 韩金玲,李彦生,杨晴,等.不同种植密度下春玉米干物质积累、分配和转移规律研究[J].玉米科学,2008,16(5):115-119. HAN J L, LI Y S, YANG Q, et al. The effect of plant density on regularity of accumulation, distribution and transfer of dry matter on spring maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(5):115-119.
- [19] 刘承,李佐同,杨克军,等.水分胁迫及复水对不同耐旱性玉米生理特性的影响[J].植物生理学报,2015,51(5):702-708. LIU C, LI Z T, YANG K J, et al. Effects of water stress and subsequent rehydration on physiological characteristics of maize (*Zea mays* L.) with

- different drought tolerance[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(5):702-708.
- [20] 李渤海, 栾丽敏, 尹飞, 等. 弱光胁迫对不同基因型玉米生长发育和产量的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(4):824-830. LI C H, LUAN L M, YIN F, et al. Effects of light stress at different stages on the growth and yield of different maize genotypes (*Zea mays* L.)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4):824-830.
- [21] 孙骏威, 杨勇, 黄宗安, 等. 聚乙烯醇诱导水分胁迫引起水稻光合下降的原因探讨[J]. *中国水稻科学*, 2004, 18(6):539-543. SUN J W, YANG Y, HUANG Z A, et al. Reason for photosynthetic decline in rice from water stress induced by polyethylene glycol (PEG)[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2004, 18(6):539-543.
- [22] 王红丽, 张绪成, 于显枫, 等. 半干旱区氮肥运筹对全膜双垄沟播玉米水肥利用和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(2):449-458. WANG H L, ZHANG X C, YU X F, et al. Effects of optimal nitrogen fertilizer management on water and fertilizer utilization efficiency and yield under double-ridge-furrow sowing with the whole plastic film mulching in maize in a semi-arid area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(2):449-458.
- [23] 肖万欣, 刘晶, 史磊, 等. 氮密互作对不同株型玉米形态、光合性能及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(19):3690-3701. XIAO W X, LIU J, SHI L, et al. Effect of nitrogen and density interaction on morphological traits, photosynthetic property and yield of maize hybrid of different plant types[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(19):3690-3701.
- [24] 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.
- [25] 杜琪, 王宁, 赵新华, 等. 低钾胁迫对玉米苗期光合特性和光系统 II 性能的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(3):592-599. DU Q, WANG N, ZHAO X H, et al. Effects of potassium deficiency on photosynthesis and performance of photosystem II in maize seedling stage[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(3):592-599.
- [26] 于康珂, 孙宁宁, 齐红志, 等. 不同成熟度玉米叶片光合生理对高温胁迫的响应特征及其基因型差异[J]. *河南农业科学*, 2017, 46(5):34-38. YU K K, SUN N N, QI H Z, et al. Photosynthetic physiological response character of different maturity maize leaves to heat stress and their genotype difference[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46(5):34-38.
- [27] 吕鹏, 张吉旺, 刘伟, 等. 施氮量对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4):852-860. LÜ P, ZHANG J W, LIU W, et al. Effects of nitrogen application on yield and nitrogen use efficiency of summer maize under super-high yield conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(4):852-860.
- [28] ZHANG J J, DING C W, HE P, et al. W. Establishment and validation of nutrient expert system for radish fertilization management in China[J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(5):2435-2444.
- [29] 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.
- [30] SIDKO A F, BOTVICH I Y, PISMANT I, et al. Estimation of chlorophyll content and yield of wheat crops from reflectance spectra obtained by ground-based remote measurements[J]. *Field Crops Research*, 2017, 207:24-29.
- [31] 苏瑞光. 不同质地潮土小麦玉米养分专家系统推荐施肥效应研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2014. SU R G. Studies on nutrient expert recommended fertilization of wheat and maize in different fluvo-aquic soil texture[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014.
- [32] 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*, 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.
- [33] 贺佳, 刘冰峰, 李军. 不同生育时期冬小麦 FPAR 高光谱遥感监测模型研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(2):261-269, 275. HE J, LIU B F, LI J. FPAR monitoring model of winter wheat based on hyperspectral reflectance at different growth stages[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2):261-269, 275.
- [34] 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.
- [35] 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*, 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* L.)-winter wheat (*Triticum aestivum* L.) rotation system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(11):1682-1694.
- [36] 刘永忠, 李万星, 曹晋军, 等. 高密度条件下行距配置对春玉米光合特性及产量的影响[J]. *华北农学报*, 2017, 32(3):111-117. LIU Y Z, LI W X, CAO J J, et al. Effects of row spacing on photosynthetic characteristics and yield of spring maize under high density[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(3):111-117.
- [37] 祁红彦, 周广胜, 许振柱. 北方玉米冠层光合有效辐射垂直分布及影响因子分析[J]. *气象与环境学报*, 2008, 24(1):22-26. QI H Y, ZHOU G S, XU Z Z. Vertical distribution characteristics of photosynthetically active radiation in maize canopy and its controlling factors[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2008, 24(1):22-26.
- [38] 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.
- [39] 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.