

# 玉米-小麦周年氮肥运筹对小麦‘泰山 28’产量构成和旗叶光合特性的影响

吕广德 孙宪印 孙盈盈 亓晓蕾 吴科 钱兆国\*

(泰安市农业科学研究院 小麦研究所,山东 泰安 271000)

**摘要** 为探究山东省玉米-小麦周年氮肥运筹对小麦产量构成和旗叶光合特性的影响,以玉米‘郑单 958’和小麦‘泰山 28’为材料,于 2016—2018 年生长季进行田间周年氮肥运筹试验。玉米设置 3 个施氮量水平:113( $E_1$ )、181( $E_2$ )和 249 kg/hm<sup>2</sup>( $E_3$ ),小麦设置 4 个施氮水平:90 ( $F_1$ )、135( $F_2$ )、180( $F_3$ )和 225 kg/hm<sup>2</sup>( $F_4$ )。测定分析周年不同氮肥运筹条件下‘泰山 28’旗叶 SPAD 值、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $C_i$ )和净光合速率( $P_n$ ),并分析周年氮素运筹对‘泰山 28’籽粒产量及产量构成的效应。结果表明,玉米施氮量为  $E_1$  时,‘泰山 28’旗叶 SPAD、 $T_r$ 、 $C_i$ 、 $P_n$  及产量构成随着小麦季施氮量的增加而增加,且小麦各施氮量之间差异显著;而在  $E_2$  和  $E_3$  时,‘泰山 28’旗叶 SPAD、 $T_r$ 、 $C_i$ 、 $P_n$  及产量构成均随小麦季施氮量的增加而先增加后降低。2 年结果表明, $E_2F_3$  处理条件下,‘泰山 28’的产量平均为 9 453.15 kg/hm<sup>2</sup>,较最低氮肥运筹提高 24.56%。通过通径分析发现,该周年施肥模式下穗数、穗粒数和千粒重均对‘泰山 28’的产量影响较其他施肥模式的影响显著。综上,玉米季施氮量 181 kg/hm<sup>2</sup> 和小麦季施氮量 180 kg/hm<sup>2</sup> 为‘泰山 28’周年生产的合理氮肥运筹。

**关键词** 氮肥; 小麦; 泰山 28; 光合; 产量

中图分类号 S34

文章编号 1007-4333(2021)04-0028-10

文献标志码 A

## Effects of annual nitrogen fertilization on yield structure and photosynthetic characteristics of flag leaves in ‘Taishan 28’

LV Guangde, SUN Xianyin, SUN Yingying, QI Xiaolei, WU Ke, QIAN Zhaoguo\*

(Wheat Research Institute of Tai'an Academy of Agricultural Science, Tai'an 271000, China)

**Abstract** In order to clarify the effects of annual nitrogen fertilizer operation on the yield composition and flag leaf photosynthetic characteristics of wheat in Shandong Province. Using corn ‘Zhengdan 958’ and wheat ‘Taishan 28’ as materials, annual field nitrogen fertilizer operation experiment was conducted in the growing season of 2016 – 2018. Three nitrogen application levels were set for maize: 113 ( $E_1$ ), 181 ( $E_2$ ) and 249 kg/hm<sup>2</sup> ( $E_3$ ), and four nitrogen application levels were set for wheat: 90 ( $F_1$ ), 135 ( $F_2$ ), 180 ( $F_3$ ) and 225 kg/hm<sup>2</sup> ( $F_4$ ). The SPAD value, transpiration rate ( $T_r$ ), stomatal conductance ( $C_i$ ) and net photosynthetic rate ( $P_n$ ) of ‘Taishan 28’ leaf were determined and analyzed under different nitrogen fertilizer operation conditions, and the effects of annual nitrogen operation on the grain yield and yield composition of ‘Taishan 28’ were analyzed. The results showed that when maize nitrogen application rate was  $E_1$ , SPAD,  $T_r$ ,  $C_i$ ,  $P_n$  and yield composition of ‘Taishan 28’ flag leaf increased with the increase of wheat season nitrogen application rate, and the difference of wheat nitrogen application rate was significant. Under the nitrogen application rates of both  $E_2$  and  $E_3$ , SPAD,  $T_r$ ,  $C_i$ ,  $P_n$  and yield components of ‘Taishan 28’ flag leaf all increased first and then decreased with the increase of nitrogen application in wheat season.

收稿日期: 2020-04-26

基金项目: 山东省重点研发计划(2016GNC113004); 山东省农业良种工程(2019LZG010); 泰安市科技发展计划(2019 NS094)

第一作者: 吕广德, 农艺师, E-mail: 2007guangd@163.com

通讯作者: 钱兆国, 研究员, 主要从事小麦育种与栽培工作, E-mail: qianzhaoguo@163.com

The two-year results showed that the average yield of ‘Taishan 28’ under  $E_2F_3$  treatment was 9 453.15 kg/hm<sup>2</sup>, which was 24.56% higher than the minimum nitrogen fertilizer operation. Through path analysis, it was found that the spike number, grain number per spike and 1 000-grain weight under the annual fertilization mode had a more significant influence on the yield of ‘Taishan 28’ than other fertilization modes. In conclusion, the nitrogen application amount of 181 kg/hm<sup>2</sup> in maize and 180 kg/hm<sup>2</sup> in wheat season were reasonable nitrogen application under the planting conditions of ‘Taishan 28’ anniversary.

**Keywords** nitrogen fertilizer; wheat; Taishan 28; photosynthesis; yield

小麦和玉米是我国重要的粮食作物,玉米-小麦轮作是我国黄淮海地区的一种重要的种植模式,我国人均耕地少,提高单位面积产量对国家粮食安全有重要作用。氮素作为玉米和小麦生长的主要能量来源,在一定施用范围内可以显著提高玉米和小麦的籽粒产量。当前生产中主要通过大量增施化肥来追求作物高产。已有研究发现,施肥量与作物产量呈显著正相关<sup>[1]</sup>,据2014—2016年我国种植业化肥施用状况调查发现,玉米和小麦年均氮肥施用量分别为325.6和300.2 kg/hm<sup>2</sup>,但利用率仅为20%~40%<sup>[2-3]</sup>。当前种植模式往往只考虑单季的产量和资源利用率,忽略周年的氮肥施用,有报道显示,周年施氮水平对玉米和小麦产量及产量构成因素有重要影响<sup>[4]</sup>。玉米和小麦单季施肥往往有很大的随意性,不考虑氮肥的盈余量,缺乏周年氮肥统筹管理意识,同时,氮素施用过多并未显著增加作物的经济产量<sup>[5-7]</sup>,且导致一系列问题的出现,比如氮肥利用率持续下降<sup>[7-8]</sup>、地下水污染加重<sup>[9]</sup>,进而可能加重对农田生态系统的环境威胁<sup>[10-11]</sup>。作物光合作用提供的能量对作物本身的生长发育及产量提高有重要作用,测定不同氮素水平下的小麦光合特性可以反映出两者对小麦产量提高的相互作用。

目前,玉米-小麦周年氮肥运筹对小麦特别是‘泰山28’产量及光合特性的研究尚未见报道。本试验设置玉米-小麦周年氮素运筹条件,其中玉米季

设置3个施氮量水平,小麦季设置4个施氮量水平,分析周年氮素水平对小麦‘泰山28’产量构成及光合特性的影响,旨在探讨适种区域周年种植条件下氮素水平对‘泰山28’高产的生理机制,以期对小麦‘泰山28’高产栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

2016—2018年,玉米、小麦生长季在山东省泰安市农业科学研究院肥城实验基地(35°57′N, 116°47′E)进行,土壤类型为砂浆黑土,地力水平为中高产地。玉米-小麦周年轮作种植。玉米播种前0~40 cm土层土壤养分含量,见表1。

供试玉米品种为‘郑单958’,小麦品种为多穗型品种‘泰山28’。‘郑单958’设置3个施氮量处理:113( $E_1$ )、181( $E_2$ )和249 kg/hm<sup>2</sup>( $E_3$ ),施氮时期为播种期基施和大喇叭口期追施,比例为1:1。小麦‘泰山28’设置4个氮肥处理:90( $F_1$ )、135( $F_2$ )、180( $F_3$ )和225 kg/hm<sup>2</sup>( $F_4$ ),氮肥基肥和追肥比例为1:1,追肥时期为拔节期。共12个处理,3次重复。玉米种植密度为67 500株/hm<sup>2</sup>,试验小区面积8.0×4.8=38.4 m<sup>2</sup>。小麦基本苗为225×10<sup>4</sup>株/hm<sup>2</sup>,小区面积为8.0×1.5=12 m<sup>2</sup>。玉米和小麦单季磷肥和钾肥分别是过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 16%)120 kg/hm<sup>2</sup>和硫酸钾(含K<sub>2</sub>O 50%)90 kg/hm<sup>2</sup>,作为基肥一并施入。其他管理措施同一般大田。

表1 2016和2017年玉米种植前土壤养分含量

Table 1 Soil nutrient content before maize planting in 2016 and 2017

年份 Year	土层/cm Soil profile	全氮/(g/kg) Total N	速效磷/(mg/kg) Available P	速效钾/(mg/kg) Available K
2016	0~20	1.65	28.36	111.43
	>20~40	0.97	5.39	83.54
2017	0~20	1.64	27.59	112.22
	>20~40	0.89	4.97	76.69

## 1.2 测定项目和方法

### 1.2.1 旗叶叶绿素含量及光合参数的测定

在开花期随机选取长势均匀的 10 株小麦挂牌标记,用 SPAD-502 叶绿素测定仪测定旗叶叶绿素含量(SPAD)值,花后每隔 15 d 测定 1 次,计算平均值。小麦开花后在 9:00—11:00 使用 CIRAS-2 便携式光合作用系统测定旗叶的光合参数(光合速率、蒸腾速率和气孔导度),每隔 7 d 测定 1 次。

### 1.2.2 籽粒产量及产量构成因素

在成熟期每个小区选取 1 m<sup>2</sup> 调查穗数;随机取 10 穗,数穗粒数;脱粒后自然风干至含水量为 13.0% 时测定千粒重及收获小区面积的籽粒产量。每个处理共计 3 次重复。

### 1.2.3 氮肥利用效率和氮肥收获指数的计算

氮肥利用效率(NUE) = 收获小区产量/小区施肥量;

氮肥收获指数(NHI) = 籽粒氮积累总量/植株氮素积累总量。

### 1.2.4 数据处理

采用 SPSS 20 软件对数据进行统计分析和通径分析。由于 2 年结果基本一致,通径分析采用 2 年平均值进行分析,其余分析采用 2 年数据。采用 DPS 7.05 软件进行方差分析和多重比较( $\alpha = 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米-小麦周年氮肥运筹对小麦产量及产量构成的影响

由表 2 可知,2016—2017 和 2017—2018 年,玉米-小麦周年氮肥运筹对‘泰山 28’的穗数、穗粒数、千粒重及产量影响基本一致。其中产量变幅分别为 7 518.60~9 376.95 和 7 659.60~9 529.35 kg/hm<sup>2</sup>,增幅分别为 24.71% 和 24.41%;穗数变幅分别为 555.3~633.9 和 557.6~636.8 万穗/hm<sup>2</sup>,增幅分别为 14.15% 和 14.20%;穗粒数变幅分别为 33.5~39.6 和 33.7~39.8 粒,增幅 18.20% 和 18.10%;千粒重变幅为 42.03~48.85 和 42.55~49.42 g,增幅分别为 16.23% 和 16.15%。玉米施氮量为  $E_1$  时,随着小麦季施氮量的增加,‘泰山 28’产量及产量构成均呈现增加的趋势;玉米施氮量为  $E_2$  和  $E_3$  时,随着小麦季施氮量的增加,‘泰山 28’产量及产量构成均呈现先增加后降低的趋势,分别在  $E_2F_3$  和  $E_3F_2$  周年氮素运筹下最高。小麦季的氮

素利用效率在  $E_3F_1$  时最高,2 年分别达到 90.22 和 92.05 kg/kg,在  $E_1F_4$  时最低,分别为 37.49 和 38.52 kg/kg。小麦氮素收获指数却在  $E_2F_3$  时最低,分别为 0.72 和 0.70。由显著性检验可知,玉米施氮水平、小麦季施氮水平及两者之间的互作对‘泰山 28’籽粒产量、产量构成、氮素利用效率和氮素收获指数的影响均呈极显著水平。

### 2.2 玉米-小麦周年氮肥运筹对小麦产量构成因素的通径分析

‘泰山 28’产量性状的 Shapiro-Wilk 检验统计量为 0.978,显著水平为  $0.974 > 0.050$ ,所以‘泰山 28’的产量性状服从正态分布,可以进行回归分析。得出穗数( $x_1$ )、穗粒数( $x_2$ )、千粒重( $x_3$ )与籽粒产量的线性回归方程  $y = -3 433.09 + 3.151x_1 + 91.475x_2 + 147.564x_3$ 。由 DPC 可以得出  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  对  $y$  的直接作用分别是:0.138、0.324 和 0.542。结果表明, $x_1$ 、 $x_2$  和  $x_3$  的偏回归系数显著性均  $> 0.950$ ,说明自变量与因变量之间存在显著性差异。

由表 3 可知,在玉米-小麦周年氮肥条件下,‘泰山 28’产量构成要素中,千粒重的直接作用最大,穗粒数次之,穗数的直接作用最小。千粒重通过穗数对产量产生的间接作用较小(0.136),但是由于千粒重的直接通径系数(DPC $x_3 = 0.542$ )较大以及千粒重通过穗粒数对产量的间接作用,使千粒重对产量的影响最大。但在本试验条件下,‘泰山 28’穗数的 DPC 最小,为 0.138,但穗粒数和千粒重对穗数的 IDPC 均较大,分别为 0.315 和 0.532,对产量有显著影响,PMCC=0.985。穗粒数的直接通径系数值(DPC $x_2 = 0.324$ )也较小,但穗数和千粒重对穗粒数的间接通径系数均较大(0.134 和 0.526),对产量也有显著影响(PMCC=0.984)。

### 2.3 玉米-小麦周年氮肥运筹对小麦旗叶 SPAD 的影响

如表 4 和表 5 所示,从小麦开花期到开花后 15、30 和 45 d 的 SPAD 在所有玉米-小麦周年氮肥运筹条件下均呈现先上升后降低的趋势,花后 15 d 时的小麦 SPAD 最高,2 年结果分别为 62.48 (2016—2017 年)和 62.85 (2017—2018 年)。每个时期的小麦 SPAD 均在  $E_2F_3$  处理最高,在 0、15 和 30 d 时与其他氮素运筹处理的 SPAD 存在显著差异。在开花期(花后 0 d),SPAD 最高值较最低值增加 10.53% (2016—2017 年)和 10.55% (2017—2018 年);在花后 15 d 时,SPAD 最高值较最低值

表2 玉米-小麦周年氮肥运筹对小麦‘泰山28’产量及产量构成的影响

Table 2 Effects of annual nitrogen fertilization on yield and yield structure of ‘Taishan 28’

年份 Year	处理 Treatment	穗数/ (10 <sup>4</sup> /hm <sup>2</sup> ) SN	穗粒数 GNS	千粒重/g TGW	产量/ (kg/hm <sup>2</sup> ) Yield	氮肥利用效 率/(kg/kg) NUE	氮肥收获 指数 NHI
2016— 2017	<i>E</i> <sub>1</sub> <i>F</i> <sub>1</sub>	555.3 f	33.5 i	42.03 i	7 518.60 j	83.54 c	0.82 ab
	<i>E</i> <sub>1</sub> <i>F</i> <sub>2</sub>	570.2 e	34.0 hi	43.12 hi	7 802.40 i	57.80 f	0.82 ab
	<i>E</i> <sub>1</sub> <i>F</i> <sub>3</sub>	591.3 cd	35.8 efg	45.06 efg	8 337.15 f	46.32 i	0.83 a
	<i>E</i> <sub>1</sub> <i>F</i> <sub>4</sub>	594.6 cd	36.4 def	45.68 def	8 434.35 f	37.49 k	0.81 ab
	<i>E</i> <sub>2</sub> <i>F</i> <sub>1</sub>	581.4 de	34.6 ghi	44.09 gh	8 000.70 h	88.90 b	0.82 ab
	<i>E</i> <sub>2</sub> <i>F</i> <sub>2</sub>	618.5 b	37.6 bcd	46.56 cd	8 722.05 d	64.61 e	0.80 cd
	<i>E</i> <sub>2</sub> <i>F</i> <sub>3</sub>	633.9 a	39.6 a	48.85 a	9 376.95 a	52.09 g	0.72 f
	<i>E</i> <sub>2</sub> <i>F</i> <sub>4</sub>	624.2 d	38.2 abc	47.03 bcd	8 885.85 c	39.49 j	0.79 d
	<i>E</i> <sub>3</sub> <i>F</i> <sub>1</sub>	588.3 cd	35.2 fgh	44.51 fgh	8 119.35 g	90.22 a	0.83 ab
	<i>E</i> <sub>3</sub> <i>F</i> <sub>2</sub>	629.1 ab	39.1 ab	48.16 ab	9 185.55 b	68.04 d	0.75 e
	<i>E</i> <sub>3</sub> <i>F</i> <sub>3</sub>	626.0 ab	38.5 abc	47.53 abc	9 079.35 b	50.44 h	0.76 e
	<i>E</i> <sub>3</sub> <i>F</i> <sub>4</sub>	599.1 c	37.2 cde	46.15 cde	8 579.10 e	38.13 k	0.81 bc
显著性检验 Test of significance ( <i>F</i> -value)	<i>F</i> <sub>E</sub> <i>F</i> <sub>F</sub> <i>F</i> <sub>E</sub> × <i>F</i> <sub>F</sub>	44 047.71** 2 840.34** 419.91**	214 581.87** 18 793.77** 2 957.79**	3 690.14** 1 447.29** 221.71**	96 633.03** 81 484.64** 11 194.98**	101 364.99** 299 718.23** 9 857.44**	587.44** 302.76** 198.10**
2017— 2018	<i>E</i> <sub>1</sub> <i>F</i> <sub>1</sub>	557.6 d	33.7 i	42.55 i	7 659.60 j	85.11 c	0.78 ab
	<i>E</i> <sub>1</sub> <i>F</i> <sub>2</sub>	572.9 cd	34.1 hi	43.72 h	7 971.90 i	59.05 f	0.78 ab
	<i>E</i> <sub>1</sub> <i>F</i> <sub>3</sub>	594.9 b	36.0 efg	45.55 fg	8 463.45 f	47.02 i	0.80 a
	<i>E</i> <sub>1</sub> <i>F</i> <sub>4</sub>	597.2 b	36.4 def	46.29 ef	8 667.30 e	38.52 k	0.78 ab
	<i>E</i> <sub>2</sub> <i>F</i> <sub>1</sub>	584.3 bc	34.7 ghi	44.61 gh	8 162.40 h	90.69 b	0.79 ab
	<i>E</i> <sub>2</sub> <i>F</i> <sub>2</sub>	620.9 a	37.8 bcd	47.15 cde	8 950.20 c	66.30 e	0.77 bc
	<i>E</i> <sub>2</sub> <i>F</i> <sub>3</sub>	636.8 a	39.8 a	49.42 a	9 529.35 a	52.94 g	0.70 f
	<i>E</i> <sub>2</sub> <i>F</i> <sub>4</sub>	626.9 a	38.4 abc	47.62 cd	9 049.35 c	40.22 j	0.76 cd
	<i>E</i> <sub>3</sub> <i>F</i> <sub>1</sub>	590.3 bc	35.4 fgh	45.14 g	8 284.35 g	92.05 a	0.79 ab
	<i>E</i> <sub>3</sub> <i>F</i> <sub>2</sub>	631.8 a	39.2 b	48.71 ab	9 338.70 b	69.18 d	0.72 ef
	<i>E</i> <sub>3</sub> <i>F</i> <sub>3</sub>	629.1 a	38.7 abc	48.13 bc	9 258.90 b	51.44 h	0.73 de
	<i>E</i> <sub>3</sub> <i>F</i> <sub>4</sub>	602.0 b	37.3 cde	46.74 de	8 785.35 d	39.05 k	0.77 bc
显著性检验 Test of significance ( <i>F</i> -value)	<i>F</i> <sub>E</sub> <i>F</i> <sub>F</sub> <i>F</i> <sub>E</sub> × <i>F</i> <sub>F</sub>	53 086.14** 3 903.20** 543.91**	22 179.68** 26 448.51** 4 152.92**	2 611.10** 3 242.54** 492.33**	98 890.73** 69 155.45** 9 280.72**	59 610.71** 328 794.65** 10 387.42**	1 253.71** 444.67** 291.46**

注：SN，穗数；GNS，穗粒数；TGW，千粒重；NUE，氮肥利用效率；NHI，氮肥收获指数；*E*<sub>1</sub>，N 113 kg/hm<sup>2</sup>；*E*<sub>2</sub>，N 181 kg/hm<sup>2</sup>；*E*<sub>3</sub>，N 249 kg/hm<sup>2</sup>；*F*<sub>1</sub>，N 90 kg/hm<sup>2</sup>；*F*<sub>2</sub>，N 135 kg/hm<sup>2</sup>；*F*<sub>3</sub>，N 180 kg/hm<sup>2</sup>；*F*<sub>4</sub>，N 225 kg/hm<sup>2</sup>；*F*<sub>E</sub>、*F*<sub>F</sub>、*F*<sub>E</sub>×*F*<sub>F</sub>、分别表示试验玉米施氮水平、小麦施氮水平、试验玉米施氮水平×小麦施氮水平的 *F* 值。同列不同小写字母表示在同一品种内不同处理 0.05 水平差异显著性。\* 和 \*\* 分别表示差异达 0.05 和 0.01 水平。下同。

Note: SN, spike number; GNS, grain number per spike; TGW, thousand grain weight; NUE, nutrient use efficiency; NHI, nitrogen harvest index; *E*<sub>1</sub>, N 113 kg/hm<sup>2</sup>; *E*<sub>2</sub>, N 181 kg/hm<sup>2</sup>; *E*<sub>3</sub>, N 249 kg/hm<sup>2</sup>; *F*<sub>1</sub>, N 90 kg/hm<sup>2</sup>; *F*<sub>2</sub>, N 135 kg/hm<sup>2</sup>; *F*<sub>3</sub>, N 180 kg/hm<sup>2</sup>; *F*<sub>4</sub>, N 225 kg/hm<sup>2</sup>; *F*<sub>E</sub>、*F*<sub>F</sub>、*F*<sub>E</sub>×*F*<sub>F</sub> mean *F*-values of nitrogen application level of maize, nitrogen application level of wheat, nitrogen application level of maize×nitrogen application level of wheat. Values followed by different small letters within a column under the same hybrid treatment are significantly different at the 0.05 probability level. \*\* indicate difference at the 0.01 probability levels, respectively. The same below.

表3 产量及构成因素间的相关系数及其与产量的通径系数

Table 3 Correlation coefficients between yield and its components and path coefficients

年份 Year	变量 Variable	相关系数 Correlation coefficient				PMCC	DPC	IDPC			合计 Total
		y	$x_1$	$x_2$	$x_3$			$x_1$	$x_2$	$x_3$	
	y	1.000	0.985	0.984	0.992						
2016—	$x_1$	0.985	1.000	0.972	0.982	0.985	0.138		0.315	0.532	0.847
2018	$x_2$	0.984	0.972	1.000	0.970	0.984	0.324	0.134		0.526	0.660
	$x_3$	0.992	0.982	0.970	1.000	0.992	0.542	0.136	0.314		0.450

注： $x_1$ ，穗数； $x_2$ ，穗粒数； $x_3$ ，千粒重；y，产量；PMCC，皮尔森相关系数；DPC，直接通径系数；IDPC，间接通径系数。

Note:  $x_1$ , spike number;  $x_2$ , grain number per spike;  $x_3$ , thousand grain weight; y, yield; PMCC, Pearson product moment correlation coefficient; DPC, direct path coefficient; IDPC, indirect path coefficient.

表4 玉米-小麦周年氮肥运筹对小麦旗叶 SPAD 的影响

Table 4 Effect of annual nitrogen fertilizer on SPAD of maize and wheat

处理 Treatment	2016—2017 年花后时间/d Days after anthesis in 2016—2017				2017—2018 年花后时间/d Days after anthesis in 2016—2017			
	0	15	30	45	0	15	30	45
	$E_1F_1$	53.67 i	56.10 k	44.68 i	11.56 b	53.95 i	56.49 k	44.89 j
$E_1F_2$	54.29 hi	56.80 jk	45.54 hi	11.76 ab	54.56 hi	57.18 jk	45.76 i	12.03 ab
$E_1F_3$	55.76 ef	58.50 gh	47.53 efg	12.01 ab	56.07 ef	58.92 gh	47.77 fg	12.29 ab
$E_1F_4$	56.20 e	59.01 fg	48.12 def	12.04 ab	56.50 de	59.44 fg	48.35 ef	12.33 ab
$E_2F_1$	54.83 gh	57.44 ij	46.31 gh	11.89 ab	55.13 gh	57.86 ij	46.51 hi	12.19 ab
$E_2F_2$	57.03 cd	59.97 d	49.34 cd	12.16 a	57.25 cd	60.40 de	49.50 d	12.46 ab
$E_2F_3$	59.32 a	62.48 a	52.22 a	12.29 a	59.64 a	62.85 a	52.42 a	12.58 a
$E_2F_4$	57.61 bc	60.62 cd	50.10 bc	12.21 a	57.92 bc	61.03 cd	50.36 c	12.44 ab
$E_3F_1$	55.23 fg	57.93 hi	46.88 fg	11.94 ab	55.44 fg	58.34 hi	47.11 gh	12.22 ab
$E_3F_2$	58.39 b	61.50 b	51.15 ab	12.28 a	58.60 b	61.92 b	51.39 b	12.59 a
$E_3F_3$	57.84 b	60.89 c	50.45 bc	12.26 a	58.12 b	61.25 bc	50.63 bc	12.58 a
$E_3F_4$	56.53 de	59.40 ef	48.62 de	12.10 ab	56.77 de	59.74 ef	48.81 de	12.33 ab

表5 玉米施氮量、小麦施氮量及其互作对小麦开花后小麦旗叶 SPAD 的影响

Table 5 The SPAD of flag leaf after flowering about N application rate of maize, N application rate of wheat and the interaction about N application of maize and wheat

花后时间/d Days after anthesis	2016—2017 年			2017—2018 年		
	$F_E$	$F_F$	$F_E \times F_F$	$F_E$	$F_F$	$F_E \times F_F$
0	223.59**	69.06**	12.53**	60.31**	99.95**	17.79**
15	295.28**	78.55**	14.05**	260.94**	89.28**	16.56**
30	185.97**	42.93**	7.50**	57.25**	152.09**	27.20**
45	3.67	2.90	0.32	4.52	1.76	0.27

增加 11.37% (2016—2017 年) 和 11.26% (2017—2018 年); 花后 30 d 时, SPAD 最高值较最低值增加 16.88% (2016—2017 年) 和 16.77% (2017—2018 年); 而在花后 45 d 时, SPAD 值最高与最低差异不显著。花后 0、15 和 30 d 时, 玉米施氮量、小麦施氮量及其两者之间的互作均对小麦花后旗叶 SPAD 值有极显著的影响。

## 2.4 玉米-小麦周年氮肥运筹对小麦旗叶光合特性的影响

由表 6 可知, 2 年试验中旗叶  $T_r$  在开花后 14 d 达到最高, 之后出现降低的趋势, 最高值均出现在  $E_2F_3$  处理的第 14 天, 分别为 8.88 和 9.42 mmol/(m<sup>2</sup>·s)。在  $E_1$  水平下, 随着小麦季施氮量的增加, 旗叶的  $T_r$  总体表现增加的趋势, 结果显示 2 年最高值较  $F_1$  分别增加 4.68% ( $F_2$ ), 13.55% ( $F_3$ ) 和 15.61% ( $F_4$ ); 在  $E_2$  和  $E_3$  条件下, 随着小麦季施氮量的增加, 旗叶  $T_r$  的变化趋势是先增加后降低。结果表明,  $E_2F_3$  处理显著提高‘泰山 28’开花后 7~28 d 的  $T_r$ 。

由表 7 可知, 旗叶  $C_i$  在开花后 7 d 达到最高, 在 14 天出现缓慢下降, 之后出现快速降低的趋势, 2 年结果均显示最高值均出现在  $E_2F_3$  处理的第 7 天, 分别为 0.89 和 0.96 mmol/(m<sup>2</sup>·s)。在  $E_1$  水平下, 随着‘泰山 28’施氮量的增加, 各测定时间旗叶  $C_i$  均表现增加的趋势; 在  $E_2$  和  $E_3$  条件下, 随着‘泰山 28’施氮量的增加, 各测定时间旗叶  $C_i$  的变化趋势是先增加后降低。 $E_2F_3$  处理显著提高‘泰山 28’花后 7~28 d 旗叶  $C_i$ 。

由表 8 可知, 旗叶  $P_n$  和  $C_i$  变化趋势一致, 均在花后 7 d 达到最高, 之后出现降低的趋势, 最高值同样出现在  $E_2F_3$  处理的第 7 天, 2 年结果分别为 24.35 和 25.51  $\mu$ mol/(m<sup>2</sup>·s)。在  $E_1$  水平下, 随着‘泰山 28’施氮量的增加, 各测定时间均表现增加的趋势; 在  $E_2$  和  $E_3$  条件下, 随着‘泰山 28’施氮量的增加, 各测定时间的变化趋势是先增加后降低。试验结果表明,  $E_2F_3$  处理显著提高‘泰山 28’开花后 7~28 d 的旗叶  $P_n$ , 有利于小麦进行光合作用合成碳水化合物, 为籽粒产量形成奠定基础。

表 6 玉米小麦周年氮肥运筹对小麦‘泰山 28’旗叶  $T_r$  的影响

Table 6 Effect of annual nitrogen fertilization on  $T_r$  of flag leaf of ‘Taishan 28’ mmol/(m<sup>2</sup>·s)

处理 Treatment	2016—2017 年花后时间/d Days after anthesis					2017—2018 年花后时间/d Days after anthesis				
	0	7	14	21	28	0	7	14	21	28
	$E_1F_1$	3.02 i	4.61 j	6.82 i	5.56 g	2.13 j	3.25 h	4.99 h	7.29 i	5.77 g
$E_1F_2$	3.22 h	4.88 i	7.13 h	5.95 f	2.75 i	3.46 gh	5.35 g	7.64 h	6.19 f	3.08 f
$E_1F_3$	3.64 f	5.55 gh	7.77 fg	5.81 fg	3.63 f	3.85 ef	5.93 f	8.25 f	7.12 c	4.02 c
$E_1F_4$	3.71 ef	5.71 fg	7.92 ef	6.03 ef	3.85 e	3.91 de	6.27 e	8.39 ef	7.07 cd	4.26 b
$E_2F_1$	3.43 g	5.45 h	7.57 g	5.68 g	3.06 h	3.62 fg	5.56 g	7.88 gh	6.54 e	3.43 e
$E_2F_2$	3.94 cd	6.06 de	8.28 cd	6.53 d	4.03 d	4.16 bcd	6.46 de	8.78 cd	6.89 d	3.79 d
$E_2F_3$	4.35 a	6.66 a	8.88 a	7.35 a	4.79 a	4.55 a	7.08 a	9.42 a	7.75 a	4.66 a
$E_2F_4$	4.03 c	6.21 cd	8.43 bc	6.74 cd	4.35 c	4.23 bc	6.63 cd	8.92 bc	7.08 cd	3.97 cd
$E_3F_1$	3.55 fg	5.38 h	7.62 g	5.58 g	3.36 g	3.83 ef	5.84 f	8.16 fg	5.91 g	2.81 g
$E_3F_2$	4.21 ab	6.47 ab	8.69 ab	7.13 ab	4.85 a	4.42 ab	6.88 ab	9.21 ab	7.52 b	4.41 b
$E_3F_3$	4.11 bc	6.33 bc	8.55 bc	6.91 bc	4.62 b	4.33 ab	6.74 bc	9.06 bc	7.29 c	4.24 b
$E_3F_4$	3.82 de	5.87 ef	8.09 de	6.25 e	4.01 d	4.03 cde	6.26 e	8.58 de	6.64 e	3.53 e
$F_E$	71.22**	282.93**	37.99**	129.27**	1 873.97**	30.62**	176.13**	113.31**	15.49**	52.36**
$F_F$	89.73**	71.51**	92.80**	81.05**	435.21**	33.07**	112.68**	68.25**	264.02**	241.63**
$F_E \times F_F$	13.23**	11.50**	13.58**	18.73**	58.20**	5.10**	18.80**	9.79**	49.28**	54.94**

表7 玉米小麦周年氮肥运筹对小麦‘泰山28’旗叶  $C_i$  的影响Table 7 Effect of annual nitrogen fertilization on  $C_i$  of flag leaf of ‘Taishan 28’ mmol/(m<sup>2</sup>·s)

处理 Treatment	2016—2017 年花后时间/d Days after anthesis					2017—2018 年花后时间/d Days after anthesis				
	0	7	14	21	28	0	7	14	21	28
	$E_1F_1$	0.34 i	0.58 g	0.46 h	0.28 i	0.11 g	0.42 i	0.62 g	0.53 h	0.42 g
$E_1F_2$	0.35 hi	0.58 g	0.48 gh	0.29 i	0.13 fg	0.43 hi	0.65 g	0.53 h	0.44 g	0.18 ef
$E_1F_3$	0.46 ef	0.70 ef	0.56 f	0.36 fg	0.15 efg	0.51 ef	0.74 f	0.62 ef	0.53 d	0.20 de
$E_1F_4$	0.47 e	0.72 de	0.62 e	0.39 ef	0.17 def	0.54 de	0.79 e	0.66 de	0.54 d	0.22 cd
$E_2F_1$	0.39 gh	0.67 f	0.53 fg	0.31 hi	0.13 fg	0.46 gh	0.75 f	0.56 gh	0.47 f	0.18 ef
$E_2F_2$	0.49 de	0.76 d	0.64 de	0.43 cd	0.20 bcd	0.51 ef	0.84 d	0.69 cd	0.58 c	0.25 bc
$E_2F_3$	0.62 a	0.89 a	0.80 a	0.52 a	0.25 a	0.67 a	0.96 a	0.85 a	0.66 a	0.30 a
$E_2F_4$	0.52 cd	0.81 c	0.68 cd	0.45 bc	0.22 abc	0.55 cd	0.86 cd	0.73 bc	0.61 b	0.27 ab
$E_3F_1$	0.42 fg	0.69 ef	0.53 fg	0.34 gh	0.15 efg	0.49 fg	0.74 f	0.58 fg	0.50 e	0.20 de
$E_3F_2$	0.58 ab	0.87 ab	0.77 ab	0.48 b	0.25 a	0.66 ab	0.91 b	0.82 a	0.62 b	0.30 a
$E_3F_3$	0.56 bc	0.83 bc	0.72 bc	0.47 b	0.24 ab	0.63 b	0.88 bc	0.77 b	0.61 b	0.29 a
$E_3F_4$	0.49 de	0.75 d	0.63 de	0.41 de	0.19 cde	0.58 c	0.84 d	0.68 d	0.57 c	0.24 bc
$F_E$	167.24**	83.26**	64.81**	185.38**	27.57**	55.33**	156.32**	157.91**	248.29**	47.49**
$F_F$	58.08**	79.92**	66.33**	65.54**	19.00**	89.36**	139.65**	85.39**	106.94**	20.87**
$F_E \times F_F$	10.92**	21.10**	17.93**	11.95**	3.58*	23.05**	26.67**	23.42**	13.72**	3.93*

### 3 讨论

氮素对作物产量有直接的影响,施氮可显著增加小麦籽粒产量<sup>[12-14]</sup>。薛泽民等<sup>[13]</sup>研究发现在玉米-小麦周年生产中,玉米季施氮 189 kg/hm<sup>2</sup>,小麦季施氮 231 kg/hm<sup>2</sup>,能够获得最高产量;而山楠等<sup>[15]</sup>研究发现,每季作物施氮量为 200 kg/hm<sup>2</sup> 时产量最合理,与本研究结果不一致,其原因可能与试验研究中作物生长环境和作物品种不同有关<sup>[11,13,16-19]</sup>。本研究发现,玉米季施氮 181 kg/hm<sup>2</sup>,小麦季施氮 180 kg/hm<sup>2</sup> 就能获得小麦‘泰山 28’最高产量,2 年平均结果为 9 453.15 kg/hm<sup>2</sup>,且产量构成均在该施氮条件下达到最高。同时,本研究发现,玉米-小麦周年施肥量通过穗数、穗粒数和千粒重共同影响‘泰山 28’籽粒产量,单因素的直接途径系数和其余两因素的间接途径系数累加,使得各因素对产量的相关系数较高,产量三因素对籽粒产量的相关系数分别是:穗数 0.985,穗粒数 0.984,千粒重 0.992。说明‘泰山 28’在周年氮素运筹条件下,

产量构成均对氮素敏感,且显著正相关。但有研究表明产量构成因素中普遍认为穗数对产量的影响最大<sup>[20-21]</sup>,特别是周年施肥对产量的影响<sup>[19]</sup>,分析原因可能与所用品种的特性有关。本研究中‘泰山 28’施肥模式也满足机械化及简便施肥的需求,结合鲁中地区中高产田作物产量及地力性状,探究适合于区域特性的玉-麦轮作下作物施肥模式,符合夏玉米和冬小麦机械化施肥技术的发展要求<sup>[22]</sup>。

已有研究表明,增施氮肥能够显著增加小麦叶片叶绿素含量,提高光合速率<sup>[23]</sup>,并且随着施氮水平的提高,小麦叶片光合速率呈现先增加后降低的趋势<sup>[24]</sup>。已有研究结果显示,小麦叶片叶绿素含量和光合速率均处于最高值时的施氮量水平与本研究不同<sup>[24-27]</sup>,分析原因可能与研究地区环境和所用小麦材料有关<sup>[28-29]</sup>。由于叶片在光合作用过程中对 CO<sub>2</sub> 固定能力的强弱与氮素含量的高低相关,当氮素含量超出一定阈值时会降低同化率<sup>[30]</sup>,即降低碳水化合物的积累,影响植株生长。本研究发现,玉米季施氮 181 kg/hm<sup>2</sup> 和小麦季施氮 180 kg/hm<sup>2</sup> 时,

表8 玉米小麦周年氮肥运筹对小麦‘泰山28’旗叶  $P_n$  的影响Table 8 Effect of annual nitrogen fertilization on  $P_n$  of flag leaf of ‘Taishan 28’  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 

处理 Treatment	2016—2017 年花后时间/d Days after anthesis					2017—2018 年花后时间/d Days after anthesis				
	0	7	14	21	28	0	7	14	21	28
	$E_1F_1$	15.71 j	17.97 j	16.27 j	11.01 i	6.05 h	16.03 i	18.76 i	16.90 h	11.74 fg
$E_1F_2$	16.13 i	18.55 i	16.71 ij	11.43 hi	6.39 gh	16.52 h	19.34 h	17.39 g	12.09 ef	5.83 g
$E_1F_3$	17.28 f	19.61 g	17.97 fg	12.33 ef	6.99 ef	17.63 g	20.68 f	18.52 e	12.84 de	7.30 ef
$E_1F_4$	17.49 f	20.28 f	18.26 f	12.42 e	7.16 de	17.99 fg	21.15 e	18.93 e	13.16 cd	7.54 e
$E_2F_1$	16.46 h	18.97 h	17.16 hi	11.67 gh	6.58 fg	16.72 h	19.63 h	17.62 fg	11.21 g	6.86 f
$E_2F_2$	18.43 e	21.37 d	19.21 e	13.29 cd	7.63 c	19.13 d	22.46 c	20.06 c	13.15 cd	8.43 d
$E_2F_3$	20.53 b	24.35 a	22.64 a	15.65 a	10.01 a	21.89 a	25.51 a	22.83 a	16.57 a	9.58 b
$E_2F_4$	18.99 d	21.92 c	19.71 d	13.60 bc	8.09 b	19.39 d	22.81 c	20.35 c	14.33 b	8.54 cd
$E_3F_1$	16.82 g	19.40 g	17.53 gh	11.93 fg	6.77 efg	18.15 ef	20.13 g	18.05 f	12.50 de	7.07 f
$E_3F_2$	21.05 a	24.31 a	21.87 b	15.46 a	9.86 a	21.46 b	25.04 b	22.42 a	16.22 a	10.30 a
$E_3F_3$	19.55 c	22.52 b	20.25 c	14.03 b	8.48 b	20.94 c	22.45 c	21.94 b	15.83 a	8.97 c
$E_3F_4$	18.16 e	20.92 e	18.84 e	12.90 d	7.49 cd	18.52 e	21.76 d	19.45 d	13.62 bc	8.94 c
$F_E$	551.58**	581.98**	214.77**	323.83**	165.69**	151.98**	565.86**	625.52**	446.62**	154.98**
$F_F$	350.71**	381.64**	247.14**	111.02**	98.14**	427.62**	322.94**	249.75**	68.36**	130.32**
$F_E \times F_F$	101.20**	121.75**	82.26**	36.20**	42.36**	117.78**	114.08**	57.33**	20.10**	30.51**

‘泰山28’的旗叶净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均表现最高值,但当两者之间的用量不协调时,净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均表现为降低,说明两者之间的协调关系为玉米季施氮量为  $181 \text{ kg}/\text{hm}^2$  和小麦季施氮量为  $180 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

## 4 结论

通过测定分析周年不同氮肥运筹条件下‘泰山28’旗叶 SPAD 值、蒸腾速率、气孔导度和净光合速率,并分析周年氮素运筹对‘泰山28’籽粒产量及产量构成的效应,2 年结果表明,在玉米季施氮量为  $181 \text{ kg}/\text{hm}^2$  和‘泰山28’施氮量为  $180 \text{ kg}/\text{hm}^2$  时,‘泰山28’光合能力最强,且产量平均为  $9\ 453.15 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,较最低氮肥运筹处理提高  $24.56\%$ ,同时通过途径分析发现,该周年施肥模式下穗数、穗粒数和千粒重均对‘泰山28’的产量影响较其他施肥模式影响显著。综合考虑玉米季施氮量为  $181 \text{ kg}/\text{hm}^2$  和小麦季施氮量为  $180 \text{ kg}/\text{hm}^2$  是山东省‘泰山28’周年种植条件下的合理氮肥运筹。

## 参考文献 References

- [1] 马常宝, 卢昌艾, 任意, 展晓莹, 李桂花, 张淑香. 土壤地力和长期施肥对潮土区小麦和玉米产量演变趋势的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 796-802  
Ma C B, Lu C A, Ren Y, Zhan X Y, Li G H, Zhang S X. Effect of soil fertility and long-term fertilizer application on the yields of wheat and maize in fluvo-aquic soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(4): 796-802 (in Chinese)
- [2] 徐洋, 杨帆, 张卫峰, 孟远夺, 姜义. 2014—2016 年我国种植业化肥施用状况及问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 11-21  
Xu Y, Yang F, Zhang W F, Meng Y D, Jiang Y. Status and problems of chemical fertilizer application in crop plantations of China from 2014 to 2016 [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2019, 25(1): 11-21 (in Chinese)
- [3] 串丽敏, 何萍, 赵同科, 徐新朋, 周卫, 郑怀国. 中国小麦季氮素养分循环与平衡特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 76-86  
Chuan L M, He P, Zhao T K, Xu X P, Zhou W, Zheng H G. Nitrogen cycling and balance for wheat in China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 76-86



- (in Chinese)
- [4] 赵荣芳,陈新平,张福锁. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环平衡[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 684-687  
Zhao R F, Chen X P, Zhang F S. Nitrogen cycling and balance in winter-wheat-summer-maize rotation system in northern China plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(4): 684-687 (in Chinese)
- [5] Zhao C S, Hu C X, Huang W, Sun X C, Tan Q L, Di H J. A lysimeter study of nitrate leaching and optimum nitrogen application rates for intensively irrigated vegetable production systems in Central China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(1): 9-17
- [6] Wang Y C, Wang E L, Wang D L, Huang S M, Ma Y B, Smith C J, Wang L G. Crop productivity and nutrient use efficiency as affected by long-term fertilisation in North China Plain[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 86(1): 105-119
- [7] 杨宪龙,路永莉,同延安,马海洋,陈毓君,丁燕. 陕西关中小麦-玉米轮作区协调作物产量和环境效应的农田适宜氮肥用量[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6115-6123  
Yang X L, Lu Y L, Tong Y A, Ma H Y, Chen Y J, Ding Y. Optimum-N application rate to maximize yield and protect the environment in a wheat-maize rotation system on the Guanzhong Plain Shaanxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(21): 6115-6123 (in Chinese)
- [8] 杨帆,孟远夺,姜义,崔勇,李荣,董燕,孙钊. 2013年我国种植业化肥施用状况分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 217-225  
Yang F, Meng Y D, Jiang Y, Cui Y, Li R, Dong Y, Sun Z. Chemical fertilizer application and supply in crop farming in China in 2013 [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21(1): 217-225 (in Chinese)
- [9] 戴健,王朝辉,李强,李孟华,李富翠. 氮肥用量对旱地冬小麦产量及夏闲期土壤硝态氮变化的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 956-965  
Dai J, Wang Z H, Li Q, Li M H, Li F C. Effects of nitrogen application rate on winter wheat yield and soil nitrate nitrogen during summer fallow season on dryland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5): 956-965 (in Chinese)
- [10] 巨晓棠,谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795  
Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(4): 783-795 (in Chinese)
- [11] 张伟纳,刘宇娟,董成,谢迎新,马冬云,赵旭,岳艳军,王晨阳,郭天财. 氮肥运筹对潮土冬小麦/夏玉米产量及氮肥利用率的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 165-175  
Zhang W N, Liu Y J, Dong C, Xie Y X, Ma D Y, Zhao X, Yue Y J, Wang C Y, Guo T C. Effect of nitrogen application on yield and nitrogen use efficiency of winter wheat and summer maize in fluvo-aquic soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 165-175 (in Chinese)
- [12] 咎亚玲,王朝辉,周玲,戴健. 不同养分投入的各品种小麦产量及养分效率差异研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(9): 91-98  
Zan Y L, Wang Z H, Zhou L, Dai J. Use efficiency of different winter wheat cultivars response to different nutrient inputs [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(9): 91-98 (in Chinese)
- [13] 薛泽民,要娟娟,赵萍萍,王宏庭. 氮肥分配对冬小麦/夏玉米轮作产量和氮肥效率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(1): 59-63  
Xue Z M, Yao J J, Zhao P P, Wang H T. Influence of nitrogen fertilizer distribution on production and nitrogen use recovery within the rotation of winter wheat and summer maize [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012(1): 59-63 (in Chinese)
- [14] 孙婷,张建芳,比拉力·艾力,石元强,张迪,李国坤,王冀川. 氮素运筹对滴灌春小麦氮素吸收、利用及产量的影响[J]. 塔里木大学学报, 2019, 31(4): 29-40  
Sun T, Zhang J F, Bi L L, A L, Shi Y Q, Zhang D, Li G K, Wang J C. Effects of nitrogen management on nitrogen absorption, utilization and yield of spring wheat under drip irrigation[J]. *Journal of Tarim University*, 2019, 31(4): 29-40 (in Chinese)
- [15] 山楠,赵同科,毕晓庆,安志装,赵丽平,张怀文,杜连凤. 适宜施氮量降低京郊小麦-玉米农田 N<sub>2</sub>O 排放系数增加产量[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 163-170  
Shan N, Zhao T K, Bi X Q, An Z Z, Zhao L P, Zhang H W, Du L F. Suitable nitrogen application reducing N<sub>2</sub>O emission and improving grain yield in wheat-maize crop rotation system in Beijing suburb[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(22): 163-170 (in Chinese)
- [16] 郭瑞英,何文寿. 提高小麦产量和蛋白质含量的氮肥施用技术研究进展[J]. 宁夏农学院学报, 2003, 24(1): 69-72  
Guo R Y, He W S. Advances of research on nitrogen fertilization techniques for improving grain yield and protein content of wheat [J]. *Journal of Ningxia Agricultural College*, 2003, 24(1): 69-72 (in Chinese)
- [17] 张洋,张继,强晓敏,翟丙年,王朝辉. 不同氮效率基因型冬小麦生理特征的比较研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1319-1324  
Zhang Y, Zhang J, Qiang X M, Zhai B N, Wang Z H. Comparative study on physiological characteristics in winter wheat with different nitrogen use efficiency [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1319-1324 (in Chinese)
- [18] 姜丽娜,张雅雯,朱娅林,赵凌霄. 施氮量对不同品种小麦物质积累、转运及产量的影响[J]. 作物杂志, 2019(5): 151-158  
Jiang L N, Zhang Y W, Zhu Y L, Zhao L X. Effects of nitrogen application on dry matter accumulation, transport and yield in different wheat varieties[J]. *Crops*, 2019(5): 151-158

(in Chinese)

- [19] 王震, 李金秀, 张彬, 冯浩, 李金榜. 小麦玉米一体化氮肥运筹对小麦产量和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5): 1169-1177
- Wang Z, Li J X, Zhang B, Feng H, Li J B. Effects of different nitrogen applications on yields and nitrogen utilization efficiencies of wheats under integrated nitrogen management for wheat-maize rotation system [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2018, 24(5): 1169-1177 (in Chinese)
- [20] 赵倩, 姜鸿明, 孙美芝, 李林志, 辛庆国. 山东省区试小麦产量与产量构成因素的相关和通径分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(7): 42-45
- Zhao Q, Jiang H M, Sun M Z, Li L Z, Xin Q G. Correlation and path analysis of yield components of winter wheat varieties with high yield potential cultured in regional trials of Shandong Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(7): 42-45 (in Chinese)
- [21] 周芳菊, 陈桥生, 张道荣, 汤清益, 姜齐斌, 王艳, 刘先斌, 陆天泰. 小麦产量构成因素的相关性分析[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(23): 5287-5289
- Zhou F J, Chen Q S, Zhang D R, Tang Q Y, Jiang Q B, Wang Y, Liu X B, Lu T T. Correlation analysis on yield components of wheat[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(23): 5287-5289 (in Chinese)
- [22] 李岚涛, 任丽, 尹焕丽, 郭娅, 王海标, 张倩, 王宜伦. 施氮模式对玉-麦周年轮作系统产量和氮吸收利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(11): 1682-1694
- Li L T, Ren L, Yin H L, Guo Y, Wang H B, Zhang Q, Wang Y L. Effects of nitrogen application methodologies on yield and nitrogen use efficiencies in a summer maize (*Zea mays*)-winter wheat (*Triticum aestivum*) rotation system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(11): 1682-1694 (in Chinese)
- [23] 宋飞, 李世清, 王辉. 施氮对灌浆期冬小麦不同叶片 SPAD 值及光合速率的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(6): 172-174
- Song F, Li S Q, Wang H. Effect of nitrogen on SPAD and photosynthesis rate of different leaves of winter wheat at grain filling stage[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(6): 172-174 (in Chinese)
- [24] 葛君, 姜晓君. 施氮量对小麦旗叶光合特性、SPAD 值、籽粒产量及碳氮代谢的影响[J]. 天津农业科学, 2019, 25(3): 1-4
- Ge J, Jiang X J. Effects of nitrogen application on photosynthetic characteristics, SPAD value, grain yield and carbon and nitrogen metabolism of flag leaves in wheat[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2019, 25(3): 1-4 (in Chinese)
- [25] 王月福, 姜东, 于振文, 曹卫星. 氮素水平对小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响及其生理基础[J]. 中国农业科学, 2003, 36(5): 513-520
- Wang Y F, Jiang D, Yu Z W, Cao W X. Effects of nitrogen rates on grain yield and protein content of wheat and its physiological basis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(5): 513-520 (in Chinese)
- [26] 王美, 赵广才, 石书兵, 常旭虹, 王德梅, 杨玉双, 郭明明, 亓振, 王雨, 刘孝成. 施氮及控水对黑粒小麦旗叶光合特性及籽粒灌浆的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(1): 179-186
- Wang M, Zhao G C, Shi S B, Chang X H, Wang D M, Yang Y S, Guo M M, Qi Z, Wang Y, Liu X C. Effect of nitrogen rate and irrigation after anthesis on photosynthesis and filling characteristics in black wheat [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(1): 179-186 (in Chinese)
- [27] 张运红, 杜君, 和爱玲, 孙克刚, 张洁梅, 丁华, 许为钢. 施氮对不同基因型小麦品种光合特性和产量的影响[J]. 河南农业科学, 2016, 45(11): 19-24
- Zhang Y H, Du J, He A L, Sun K G, Zhang J M, Ding H, Xu W G. Effects of nitrogen application on photosynthetic characteristics and yield for different genotypes of wheat[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2016, 45(11): 19-24 (in Chinese)
- [28] 孟自力, 王和洲, 闫向泉, 朱倩, 曾辉, 陈昆, 朱伟. 施氮量对小麦商麦 156 光合特性、冠层光截获及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(23): 76-79
- Meng Z L, Wang H Z, Yan X Q, Zhu Q, Zeng H, Chen K, Zhu W. Effects of nitrogen application on photosynthetic characteristics, canopy light capture and yield of shangmai 156 [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(23): 76-79 (in Chinese)
- [29] 王金金, 刘小利, 刘佩, 石红霞, 黎景来, 宁燕珊, 张鹏, 贾志宽, 任小龙. 秸秆还田条件下减施氮肥对旱地冬小麦水氮利用、光合及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 40(1): 1-10
- Wang J J, Liu X L, Liu P, Shi H X, Li J L, Ning Y S, Zhang P, Jia Z K, Ren X L. Effects of nitrogen amount on water and nitrogen utilization, photosynthetic characteristics during flowering stage and yield characteristics of winter wheat in dry farmland with straw incorporation[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 40(1): 1-10 (in Chinese)
- [30] 张秋英, 李发东, 刘孟雨. 冬小麦叶片叶绿素含量及光合速率变化规律的研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 95-98
- Zhang Q Y, Li F D, Liu M Y. Changing laws of chlorophyll content and photosynthetic rate in winter wheat leaves[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3): 95-98 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅