

# 不同施氮水平对大麦光合性能及 氮素积累和转运的影响

德木其格<sup>1</sup>,刘志萍<sup>2</sup>,王磊<sup>1</sup>,王金波<sup>1</sup>,齐海祥<sup>1</sup>,郭呈宇<sup>2</sup>,吕二锁<sup>2</sup>,巴图<sup>2</sup>,徐寿军<sup>1</sup>

(1. 内蒙古民族大学 农学院, 内蒙古 通辽 028043; 2. 内蒙古自治区农牧业科学院 作物育种与栽培研究所, 内蒙古 呼和浩特 010031)

**摘要:**为探究氮素水平对大麦光合性能及氮肥利用效率的影响,研究大麦氮高效形成的机理,以蒙啤3号、垦啤7号2个品种为试材,设0,90,180,270 kg/hm<sup>2</sup>纯氮4个氮肥处理,分析了不同施氮水平下不同氮效率大麦开花期叶片光合性能、花后氮素积累和转运及氮肥利用效率的差异及相关性。结果表明:随着施氮水平的升高,2个品种大麦的Chl、Pn、Gs、Tr、Fo、Fm、Fv/Fm、qP、花后氮素积累率及其对籽粒贡献率均呈先升高后降低的趋势,在施氮量为180 kg/hm<sup>2</sup>时达到峰值,叶片和茎秆的氮素转运率及其对籽粒贡献率、氮肥生产效率、氮肥生理效率呈先降低后升高的趋势,氮肥农学效率、氮肥偏生产力呈降低趋势。品种间相比,蒙啤3号的Chl、Pn、Gs、Tr、Fo、Fm、Fv/Fm、qP、叶片和茎秆氮素转运对籽粒的贡献率、NAG、PFP和产量均高于垦啤7号。花后氮素积累率及其对籽粒贡献率均为垦啤7号大于蒙啤3号;叶片和茎秆氮素转运率、NGPE、NPE无显著差异。相关分析结果显示,产量与各项光合性能指标均呈极显著正相关;花后氮素积累率及其对籽粒的贡献率与各项光合性能指标呈正相关;除叶片氮素转运率与Fv/Fm呈显著负相关外,叶片、茎秆氮素转运率与其余各项光合性能指标均呈极显著负相关;叶片氮素转运对籽粒的贡献率除与Gs和Fo呈极显著和显著负相关外,其余均呈负相关,茎秆氮素转运对籽粒的贡献率与Chl、Pn、Fv/Fm、qP呈正相关,与Gs、Tr、Fo、Fm呈负相关;NGPE与Fv/Fm呈负相关,与Chl、Pn、qP呈显著负相关,与其他光合性能指标呈极显著负相关;NAE与Chl、Gs、Fv/Fm呈正相关,与其他光合性能指标呈负相关;PFP与Fv/Fm呈正相关,与其他光合性能指标呈负相关;NPE与Chl、Pn、Fv/Fm呈显著负相关,与其他光合性能指标呈极显著负相关。综合分析后得出,适量增施氮肥有助于大麦生长发育及增产,但施氮过多会起抑制作用。蒙啤3号对氮肥响应能力强,光合性能强,转运的氮素对籽粒贡献率高,氮肥利用效率也相对较高。

**关键词:**春大麦;光合性能;氮素积累;氮肥利用效率;相关分析

中图分类号:S143.1 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2020)03-0126-10

doi:10.7668/hbxb.20190653



## Effects of Different Nitrogen Levels on Photosynthetic Performance, Nitrogen Accumulation and Translocation of Barley

DE Muqige<sup>1</sup>, LIU Zhiping<sup>2</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, WANG Jinbo<sup>1</sup>, QI Haixiang<sup>1</sup>,  
GUO Chengyu<sup>2</sup>, LÜ Ersuo<sup>2</sup>, BA Tu<sup>2</sup>, XU Shoujun<sup>1</sup>

(1. College of Agronomy, Inner Mongolia University for the Nationalities, Tongliao 028043, China;

2. Institute of Crop Breeding and Cultivation, Inner Mongolia Academy of Agricultural  
and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of nitrogen levels on barley photosynthetic performance and nitrogen fertilizer utilization efficiency, and to study the mechanism of efficient formation of barley nitrogen, two varieties of Mengpi 3 and Kenpi 7 were used as test materials, with 0, 90, 180, 270 kg/ha pure nitrogen and four nitrogen fertilizer treatments were used to analyze the differences and correlations of photosynthetic performance, nitrogen accumulation and translocation after anthesis, and nitrogen fertilizer utilization efficiency of different nitrogen efficiency barley leaves at different nitrogen application levels. The results showed that with the increase of nitrogen application rate, the accumu-

收稿日期:2020-01-08

基金项目:国家自然科学基金项目(31760357;31360307);内蒙古自治区科技储备项目(2018MDCB016);内蒙古民族大学研究生科研创新资助项目(NMDSS1864)

作者简介:德木其格(1994-),男,内蒙古锡林郭勒人,在读硕士,主要从事大麦栽培生理及其生长模拟研究。

通讯作者:徐寿军(1968-),男,内蒙古赤峰人,教授,博士,主要从事大麦栽培生理及其生长模拟研究。

lation rates of Chl, Pn, Gs, Tr, Fo, Fm, Fv/Fm, qP and post-anthesis nitrogen of the two varieties of barley increased first and then decreased. The trend of lowering height reached the peak when the nitrogen application rate was 180 kg/ha, and the nitrogen transport rate of leaves and stems and its contribution rate to grain, nitrogen production efficiency and nitrogen fertilizer physiological efficiency decreased first and then increased. The trend was that the agronomic efficiency of nitrogen fertilizer and the partial productivity of nitrogen fertilizer were decreasing. Compared with the varieties, Chl, Pn, Gs, Tr, Fo, Fm, Fv/Fm, qP, the contribution rate of leaf and stem nitrogen transport to grain, NAG, PFP and yield of Mengpi 3 were higher than those of Kenpi 7. On the Kenpi 7, and the difference mostly reached a significant level. The rate of nitrogen accumulation after flowering and its contribution to grain were all higher than that of Mengpi 3 and most of them were significantly different. There was no significant difference in nitrogen transport rate, NGPE and NPE between leaves and stems. Correlation analysis showed that there was a significant positive correlation between yield and various photosynthetic performance indicators. The nitrogen accumulation rate after anthesis and its contribution rate to grain were positively correlated with various photosynthetic performance indexes. Except for the negative nitrogen-transport rate of leaf and the negative correlation between Fv/Fm, the nitrogen transport rate of leaves and stems and other items. The photosynthesis performance index showed a significant negative correlation; the contribution rate of leaf nitrogen transport to grain was significantly negatively correlated with Gs and Fo, and the others were negatively correlated. The contribution rate of stem nitrogen transport to grain was Chl, Pn, Fv/Fm and qP were positively correlated, and negatively correlated with Gs, Tr, Fo and Fm. NGPE was negatively correlated with Fv/Fm, and negatively correlated with Chl, Pn and qP, and other photosynthetic performance indicators. There was a significant negative correlation; NAE was positively correlated with Chl, Gs, Fv/Fm, and negatively correlated with other photosynthetic performance indicators; PFP was positively correlated with Fv/Fm and negatively correlated with other photosynthetic performance indicators; NPE and Chl, Pn, Fv/Fm showed a significant negative correlation and was significantly negatively correlated with other photosynthetic performance indicators. After comprehensive analysis, it was concluded that the appropriate amount of nitrogen fertilizer application would help barley growth and production, but excessive nitrogen application would play a role in inhibition. Mengpi 3 had a strong responsiveness to nitrogen fertilizer and strong photosynthetic performance. The transferred nitrogen had a high contribution rate to the grain and the nitrogen fertilizer utilization efficiency was relatively high.

**Key words:** Spring barley; Photosynthetic performance; Nitrogen accumulation; Nitrogen use efficiency; Related analysis

氮素是作物需求最多的营养元素,是构成蛋白质、叶绿素、核酸、辅酶等物质的重要成分,在植物的生育过程中起重要作用<sup>[1]</sup>。增施氮肥,土壤耕层有效氮含量增加,有利于植株对氮素的吸收<sup>[2]</sup>,也可促进叶绿素的合成,延缓其降解,增强光合作用<sup>[3]</sup>。氮素供应不足会导致作物光合能力下降,从而导致产量下降<sup>[4]</sup>。张如标等<sup>[5]</sup>研究发现,随着施氮量的增加,啤酒大麦开花期叶片叶绿素相对含量(SPAD值)、光合速率及籽粒产量呈上升趋势,不同氮肥处理间差异显著。蔡剑等<sup>[6]</sup>研究表明,在施氮量0~225 kg/hm<sup>2</sup>,2个大麦品种开花期叶片SPAD值、净光合速率(Pn)、最大光化学效率(Fv/Fm)、籽粒产量均随着施氮量的提高而提高,施氮量超过225 kg/hm<sup>2</sup>后,上述参数又呈下降趋势,且高氮处理与低氮处理间差异显著。徐寿军等<sup>[7]</sup>研究表明,随着施氮量的提高,大麦花后氮素积累

率及其对籽粒贡献率呈上升趋势,各器官氮素转运率及对籽粒贡献率呈下降趋势,且高氮处理与低氮处理间达到显著差异。也有研究者认为,随着施氮量的增加,大麦产量增加,氮肥生产效率、氮肥农学效率、氮肥偏生产力及氮肥生理效率均下降,且不同氮肥处理间均达到显著差异水平<sup>[8]</sup>。增施氮肥虽有利于提高大麦光合性能和籽粒产量,但过量施用氮肥会降低氮肥利用效率,造成环境污染和资源浪费,威胁我国农业可持续有效发展。我国氮肥的当季利用率仅为30%~35%,其余大部分氮素则以各种形式进入大气和水体<sup>[9-10]</sup>。因此,培育氮高效大麦品种,合理施用氮肥,提高大麦氮肥利用效率,实现大麦光合性能和产量与氮肥利用效率的协调统一,是当前大麦生产亟须解决的关键问题之一。当前,氮肥水平对大麦光合作用、氮素积累与转运及氮肥利用效率等

的影响方面研究较多,而关于不同氮效率大麦对氮肥响应的差异及其光合性能与氮素积累、转运及利用的相关性鲜见报道。因此,本试验以 2 个不同氮效率大麦品种为试材,在研究不同氮肥水平下内蒙古东部灌区春大麦开花期叶片光合性能、花后氮素积累与转运及氮肥利用效率差异的基础上,分析其相关性,旨在为选育氮高效大麦品种、探究大麦氮高效形成机理提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

本试验于 2017 年和 2018 年在通辽市科尔沁区农牧业高新技术园区(43°36'N,122°22'E)进行,年平均气温为 6.1 °C,≥10 °C 活动积温为 3 160 °C,日照时数为 3 113 h,年平均降水量 350 mm。试验地耕层土壤状况见表 1。

表 1 耕层土壤状况

Tab.1 Tillage soil condition

年份 Year	有机质/(g/kg) Organic matter	碱解氮/(mg/kg) Alkaline nitrogen	速效磷/(mg/kg) Effective phosphorus	速效钾/(mg/kg) Quick-acting potassium
2017	17.52	45.20	28.32	128.52
2018	17.16	47.52	29.17	134.05

### 1.2 试验材料

供试的大麦品种为蒙啤 3 号和垦啤 7 号,由内蒙古自治区农牧业科学院提供。其中蒙啤 3 号氮效率较高,垦啤 7 号氮效率较低<sup>[11]</sup>。

### 1.3 试验设计

试验设 0,90,180,270 kg/hm<sup>2</sup> 纯氮共 4 个氮肥处理,依次标注为 CK、N1、N2、N3。肥料分 2 次施入,基肥在播种时施入,追肥在拔节时施用,基追比为 7:3。施磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 120 kg/hm<sup>2</sup>,施钾(K<sub>2</sub>O) 75 kg/hm<sup>2</sup>,磷、钾肥作为基肥一次性施用。试验按 450 万株/hm<sup>2</sup> 播种,随机区组设计,3 次重复,小区面积 20.00 m<sup>2</sup>,每小区 8 行,行长 10.00 m,行距 0.25 m。试验田灌溉条件为井灌,其他农艺管理措施相同。

### 1.4 样品的采集与测定

各小区选择长势相近、同一天开花的大麦挂牌标记,开花期取所标记大麦 20 株,将其中 10 株的倒二叶分离下来后放于液氮中速冻,然后迅速转移到 -80 °C 超低温冰箱中保存,用于测定开花期叶绿素(Chl)含量。叶绿素含量的测定:选取叶片中部剪碎,放入盛有 0.2 g 乙醇(95%)的棕色容量瓶中,定容至 50 mL,避光放置 24 h 后测定 470,649,665 nm 下的吸光度,根据赵世杰等<sup>[12]</sup>的方法计算出叶绿素含量。另外 10 株及成熟期取所标记大麦 10 株分离为叶、茎、穗等不同部位,105 °C 下杀青 0.5 h,80 °C 烘干 48.0 h 称干质量,用 FZ102 小型粉碎机(上海科恒实业发展有限公司)粉碎,用于测定氮含量。氮含量的测定:凯式定氮法<sup>[13]</sup>。大麦成熟后,每小区选择长势均匀的 2 m<sup>2</sup> 区域,记株数,穗数,人工脱粒并测产。

光合作用参数的测定:开花期每小区选取受光方向一致的标记植株 3 株,使用 LI-6400 便携式光合仪(LI-COR Inc,美国)测定净光合速率(Pn)、气

孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr),测定部位为倒二叶叶片中部,测定时间为晴天 9:00 - 12:00 时。叶绿素荧光动力学参数的测定:与光合作用测定同步进行,用 OS5p 调制叶绿素荧光仪(美国)测定初始荧光(F<sub>0</sub>)、最大荧光(F<sub>m</sub>)、最大光化学效率(F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>)、光化学猝灭系数(qP),测定前充分暗反应 20 min,测定部位同光合作用测定。

### 1.5 计算公式

花后氮素积累率 = 花后氮素积累量/收获时氮素积累量 × 100%;器官氮素转运率 = 器官氮素转运量/开花期相应器官氮素积累量 × 100%;花后氮素积累对产量的贡献率 = 1 - 花前氮素积累对产量的贡献率;氮肥生产效率(NGPE) = 籽粒产量/地上部氮积累量;氮肥农学效率(NAE) = (施氮区产量 - 不施氮区产量)/施氮量;氮肥偏生产力(PEP) = 籽粒产量/施氮量;氮肥生理效率(NPE) = (施氮区产量 - 不施氮区产量)/(施氮区地上部氮积累量 - 不施氮区地上部氮积累量)。

### 1.6 数据处理

利用 Microsoft Excel 2007 软件和 SPSS 19.0 数据处理系统进行相关数据处理。

## 2 结果与分析

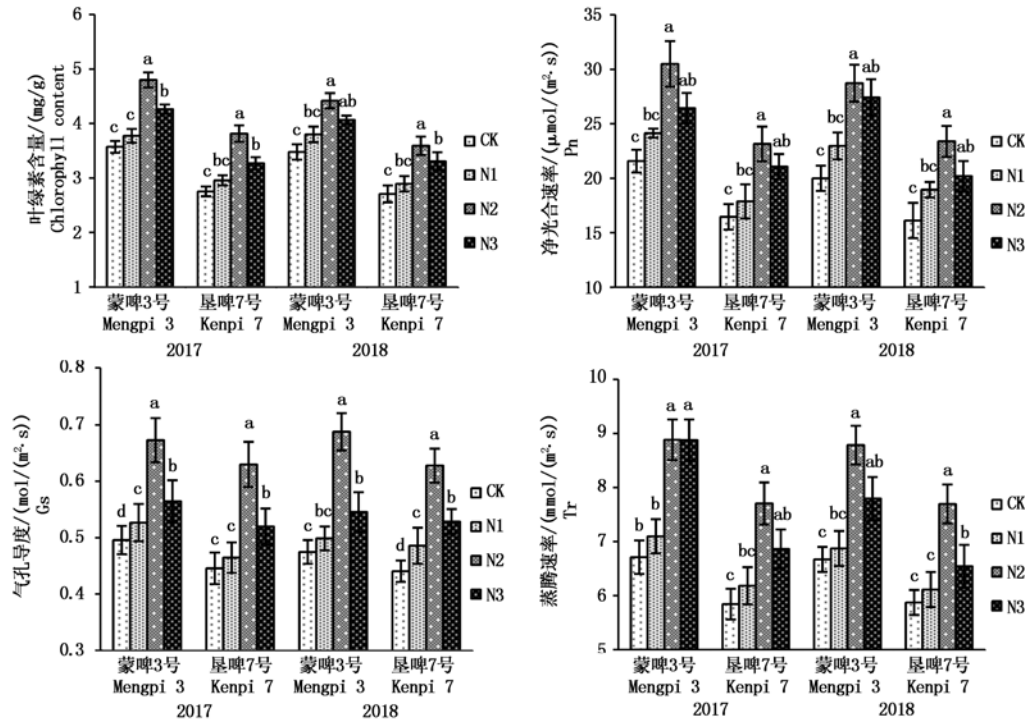
### 2.1 不同施氮水平下大麦开花期叶片光合性能的差异

2.1.1 叶绿素含量及光合特性的差异 氮肥对叶片叶绿素含量和光合特性影响较大。2017,2018 年 2 个大麦品种叶片 Chl 含量随施氮水平的升高呈先升高后降低的趋势,在 N2 处理达到峰值(图 1),蒙啤 3 号为 2.901,2.711 mg/g,垦啤 7 号为 2.409,2.297 mg/g。叶片的 Pn、Gs 和 Tr 随施氮水平升高的变化趋势与 Chl 含量相同。方差分析表明,所有 N2 处理与 CK、N1 处理间差异均达到显著水平,N3 处理各项指标数值虽低于

N2 处理,但仍高于 CK 和 N1 处理,且均与 CK 处理差异显著,N1 处理亦高于 CK 处理但二者差异大多不显著。品种间相比,同年相同处理间蒙啤 3 号的 Chl 含量、Pn、Gs 和 Tr 均高于垦啤 7 号。

2.1.2 叶片荧光参数的差异 大麦开花期的叶片荧光参数在不同处理间表现出差异(图 2),但随着施氮

量的增加,叶片荧光参数均有不同程度的提高,与 CK 处理相比,2 个品种均在 N2 处理时达到最大值,除 2018 年垦啤 7 号 Fv/Fm 外,其余荧光参数不胜数 N2 处理均与 CK、N1、N3 处理差异显著,N3 处理各项指标数值虽低于 N2 处理,与 N1 处理差异大多不显著,N1 处理与 CK 处理差异大多不显著,2017,2018 年 2



不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。图 2-5 同。

Different lowercase letters indicates a difference of 0.05 significant levels. The same as Fig. 2-5.

图 1 不同施氮水平下大麦开花期叶片叶绿素含量、Pn、Gs、Tr 的差异

Fig. 1 Differences of chlorophyll content, Pn, Gs and Tr in barley flowering stage under different nitrogen levels

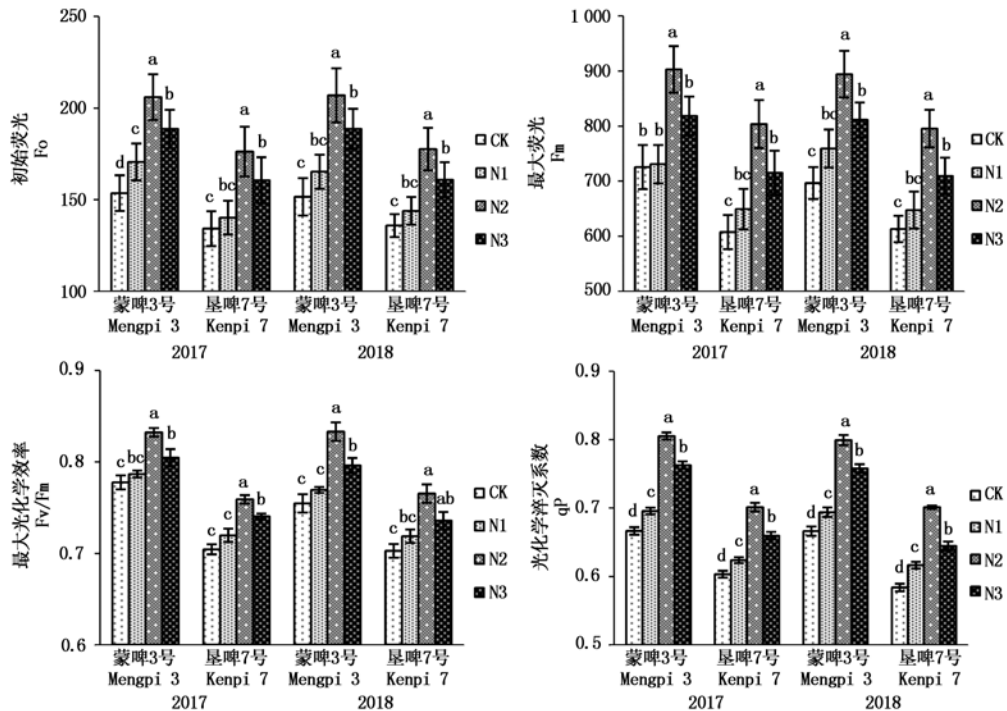


图 2 不同施氮水平下大麦开花期叶片荧光参数的差异

Fig. 2 Differences of fluorescence parameters in barley flowering stage under different nitrogen levels

个品种 qP 的各个处理间差异均达到显著水平。不同品种的叶片荧光参数有所不同,同处理中蒙啤3号的 Fo、Fm、Fv/Fm 和 qP 均高于垦啤7号。

### 2.2 不同施氮水平下大麦氮素积累与转运的差异

由图3可知,2 a 的趋势基本一致,2 个品种花后氮素积累率及其对籽粒贡献率均随施氮水平的增加呈先升高后降低的趋势,均于 N2 处理达到最高,施氮处理均高于 CK; 叶片、茎秆的转运率及其对籽粒贡献率先降低而后有所上升,均于 N2 处理达到最低,施氮处理均低于 CK。方差分析结果表明,N2 处理的花后氮素积累率及其对籽粒贡献率与 CK、N1 处理差异显著,与 N3 处理差异不显著,N3 处理

与 CK 处理差异显著,与 N1 处理差异大多达到显著水平,N1 处理与 CK 处理差异大多不显著。与 CK 相比,N2 处理的叶片和茎秆氮素转运率差异显著,其余处理间差异大多不显著。叶片和茎秆氮素转运对籽粒贡献率的 CK 处理与 N2 处理间差异除 2018 年垦啤7号的叶片氮素转运对籽粒贡献率外,其余均达到显著水平。3 个施氮处理的氮素转运对籽粒贡献率均表现为 N1 > N3 > N2。品种间相比,相同处理的花后氮素积累率及其对籽粒贡献率均为垦啤7号高于蒙啤3号,叶片和茎秆氮素转运率无显著差异,叶片和茎秆氮素转运对籽粒的贡献率大多表现为蒙啤3号高于垦啤7号。

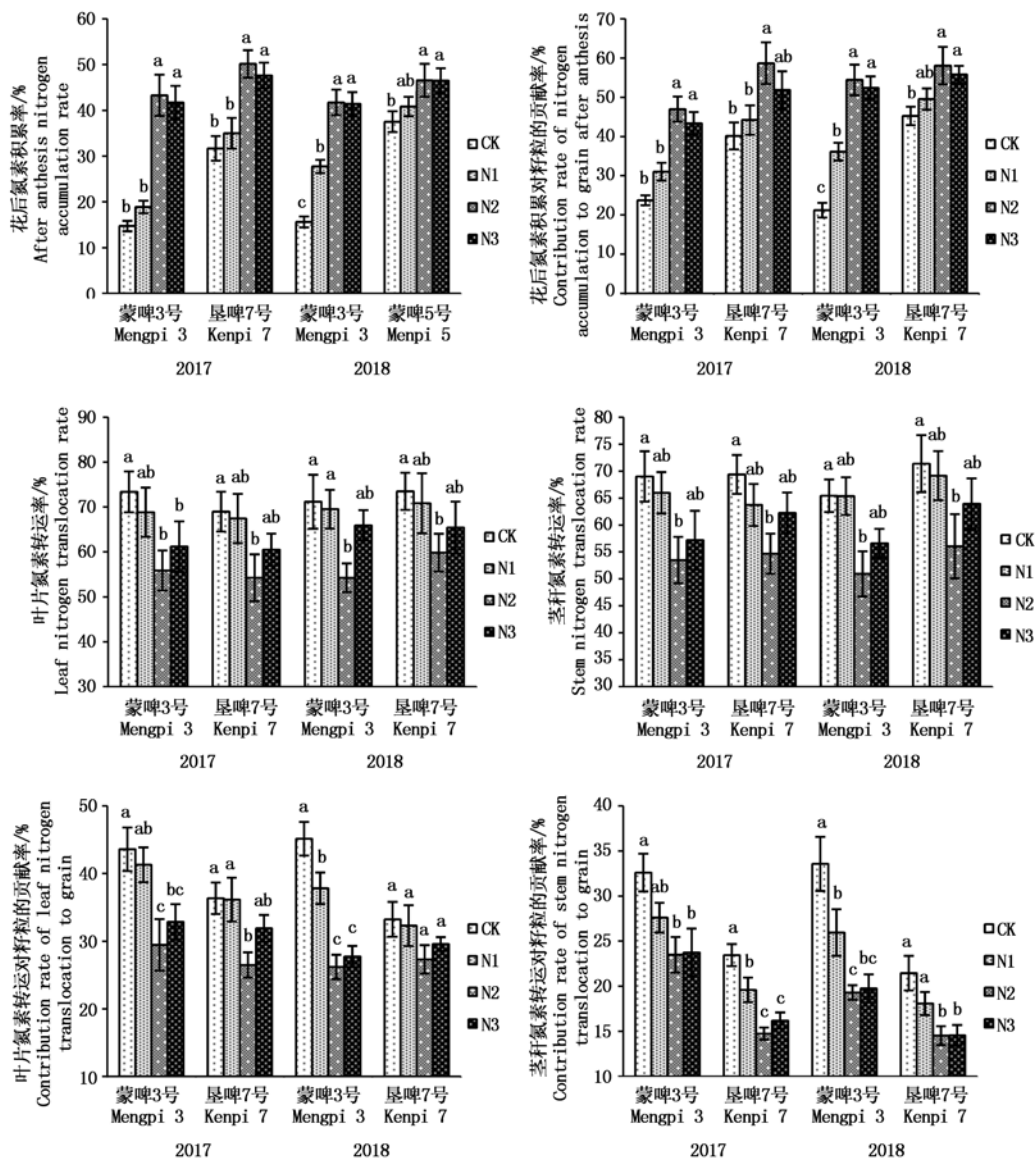


图3 不同施氮水平下大麦氮素积累与转运率及其对籽粒贡献率的差异

Fig. 3 Differences of nitrogen accumulation and translocation rate of barley and its contribution to grain yield under different nitrogen levels

### 2.3 不同施氮水平下大麦氮肥利用效率的差异

由图4可知,2个品种的 NGPE 和 NPE 均随施氮

量的增加呈先降低后升高的趋势,NAG 和 PFP 则呈下降趋势。NGPE 除 2017 年垦啤7号 N1 处理和 N3 处理

差异不显著外,其余处理间均达到显著差异水平。NAG 除 2017 年蒙啤 3 号的 N1 处理和 N2 处理差异不显著外,其余处理间均达到显著差异水平。PFP 和

NPE 的各处理间差异均达到显著水平。从品种来看,除 2018 年 NAG 的 N1 处理外,蒙啤 3 号的 NAG 和 PFP 均高于垦啤 7 号,NGPE 和 NPE 表现不明显。

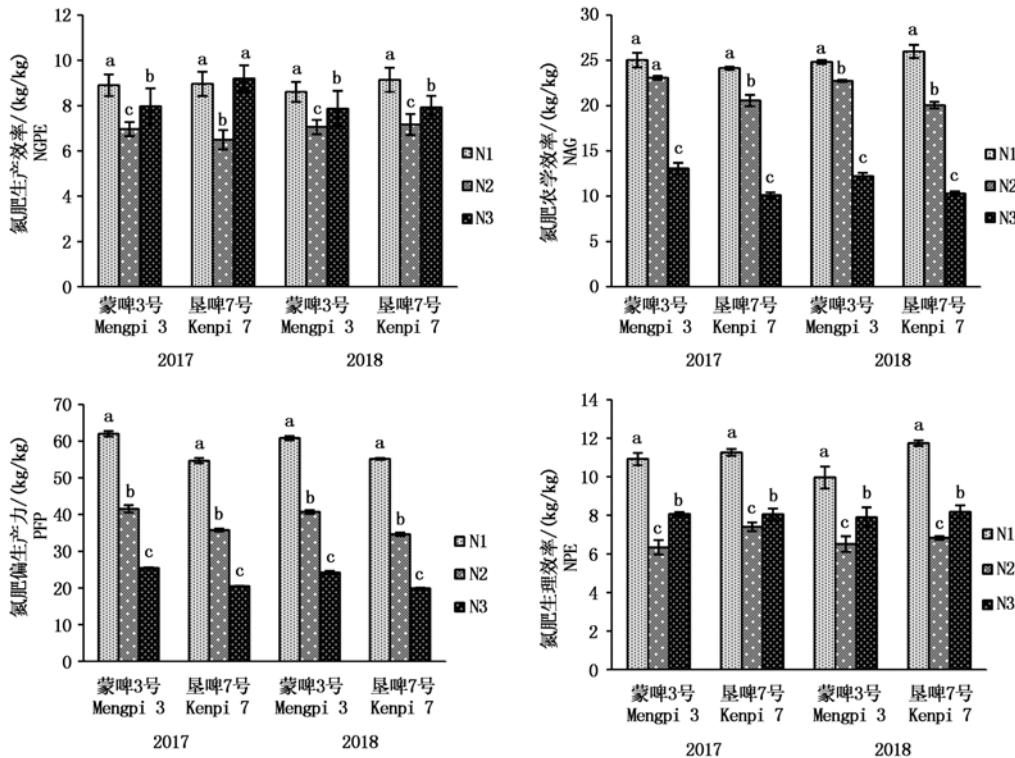


图 4 不同施氮水平下大麦氮肥利用效率的差异

Fig. 4 Differences of barley nitrogen use efficiency under different nitrogen levels

#### 2.4 不同施氮水平下大麦产量的差异

氮肥是影响作物产量的重要因素,2017,2018 年 2 个大麦品种产量均随施氮水平的升高呈先升高后降低的趋势(图 5),表现为  $N2 > N3 > N1 > CK$ ,蒙啤 3 号产量的峰值为 7 487.41,7 336.66  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,垦啤 7 号产量的峰值为 6 448.74,6 241.03  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,表明过量施氮不利于增产,同一品种不同处理间差异均达到显著水平。蒙啤 3 号各处理产量均高于垦啤 7 号。

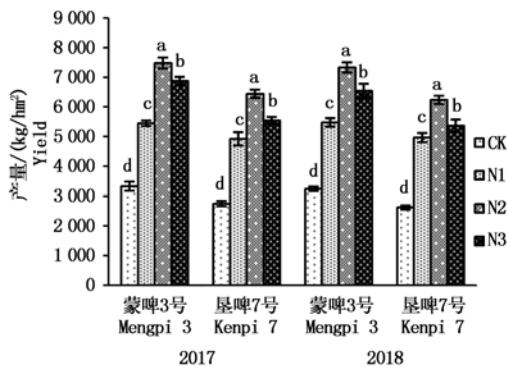


图 5 不同施氮水平下大麦产量的差异

Fig. 5 Differences of barley yield under different nitrogen application rates

#### 2.5 大麦叶片光合性能与氮素积累和转运的相关分析

相关分析(表 2)表明,花后氮素积累率及其对籽粒的贡献率与各项光合性能指标均呈正相关,其中与  $G_s$  相关性达到显著水平;除叶片氮素转运率与  $F_v/F_m$  呈显著负相关外,叶片、茎秆氮素转运率与其余各项光合性能指标均呈极显著负相关;叶片氮素转运对籽粒的贡献率与各项光合性能指标呈负相关,其中与  $G_s$  和  $F_o$  相关性分别达极显著和显著水平;茎秆氮素转运对籽粒的贡献率与  $Chl$ 、 $P_n$ 、 $F_v/F_m$ 、 $qP$  呈正相关,与  $G_s$ 、 $Tr$ 、 $F_o$ 、 $F_m$  呈负相关;产量与各项光合性能指标均呈极显著正相关。

#### 2.6 大麦叶片光合性能与氮肥利用效率的相关分析

由表 3 可知,NGPE 与  $F_v/F_m$  呈负相关,与  $Chl$ 、 $P_n$ 、 $qP$  呈显著负相关,与其他光合指标呈极显著负相关;NAE 与  $Chl$ 、 $G_s$ 、 $F_v/F_m$  呈正相关,与其他光合指标呈负相关;PFP 与  $F_v/F_m$  呈正相关,与其他光合指标呈负相关;NPE 与  $Chl$ 、 $P_n$ 、 $F_v/F_m$  呈显著负相关,与其他光合指标呈极显著负相关。

表 2 大麦叶片光合性能与氮素积累和转运及产量的相关分析  
Tab. 2 Correlation analysis of photosynthetic characteristics in barley leaves and nitrogen accumulation, translocation and yield

项目 Project	花后氮素积累率 Nitrogen accumulation rate after anthesis	花后氮素积累对籽粒贡献率 Contribution rate of nitrogen accumulation to grain after anthesis	叶片氮素转运率 Leaf nitrogen transport rate	茎秆氮素转运率 Stem nitrogen transport rate	叶片氮素转运对籽粒贡献率 Contribution rate of leaf nitrogen transport to grain	茎秆氮素转运对籽粒贡献率 Contribution rate of stem nitrogen transport to grain	产量 Yield
Chl	0.131 8	0.097 6	-0.648 8**	-0.803 3**	-0.296 0	0.109 4	0.797 3**
Pn	0.210 8	0.201 1	-0.657 4**	-0.818 9**	-0.389 5	0.002 7	0.854 8**
Gs	0.500 9*	0.519 7*	-0.901 1**	-0.922 9**	-0.655 0**	-0.348 4	0.854 4**
Tr	0.341 5	0.293 5	-0.781 8**	-0.898 4**	-0.475 6	-0.089 8	0.856 5**
Fo	0.356 9	0.352 3	-0.776 0**	-0.901 7**	-0.529 3*	-0.149 9	0.892 7**
Fm	0.319 4	0.309 1	-0.778 8**	-0.904 5**	-0.488 4	-0.107 1	0.868 9**
Fv/Fm	0.016 2	0.011 3	-0.564 6*	-0.744 8**	-0.211 9	0.192 3	0.741 4**
qP	0.214 8	0.195 4	-0.698 7**	-0.863 6**	-0.390 9	0.015 4	0.840 9**

注: \*、\*\* 表示相关性在  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  显著。表 3 同。

Note: \* and \*\* means significant correlation at 0.05 and 0.01 levels. The same as Tab. 3.

表 3 大麦叶片光合性能与氮肥利用效率的相关分析

Tab. 3 Correlation analysis between photosynthetic performance of barley leaves and nitrogen use efficiency

项目 Project	NGPE	NAE	PFP	NPE
Chl	-0.657 8*	0.001 1	-0.146 1	-0.682 9*
Pn	-0.607 5*	-0.006 2	-0.149 5	-0.671 3*
Gs	-0.892 2**	0.047 5	-0.263 0	-0.859 3**
Tr	-0.715 9**	-0.110 9	-0.315 1	-0.774 7**
Fo	-0.736 0**	-0.101 5	-0.296 3	-0.806 2**
Fm	-0.799 3**	-0.043 0	-0.263 7	-0.836 3**
Fv/Fm	-0.567 3	0.044 8	0.085 9	-0.618 9*
qP	-0.653 9*	-0.042 7	-0.208 4	-0.716 2**

### 3 讨论与结论

氮素是叶绿体的主要成分。施氮能够显著提高小麦叶片氮素、光合色素含量,增加光合速率<sup>[14]</sup>。薛崧等<sup>[15]</sup>研究表明,适量施氮能增加小麦开花期叶片总叶绿素含量。马建辉等<sup>[16]</sup>研究发现,施肥量在 0~240 kg/hm<sup>2</sup> 内,小麦开花期叶片叶绿素含量均随施氮量增加而升高,超过此范围后,各指标增幅下降。本研究结果表明,2 个大麦品种开花期叶片叶绿素含量均随施氮水平的增加呈先升高后降低的趋势,表明适量增施氮肥有助于大麦叶片叶绿素的合成。光合作用是植物进行有机物积累的重要光化学反应,施氮与植物叶片中的叶绿素含量、光合特性参数和叶绿素荧光动力学参数等存在明显的交互作用。适量增施氮肥可以改善作物地上部分的光合性能,对作物生长发育具有重要影响。王宁等<sup>[17]</sup>研究表明,高水平氮处理与低水平氮处理相比,冬小麦开

花期旗叶净光合速率和气孔导度明显增强。吴晓丽等<sup>[18]</sup>研究发现,施氮水平增加能有效提高小麦开花期叶片的光合速率。本试验中 2 个品种大麦的 Pn、Gs 和 Tr 均随施氮水平的升高呈先上升后下降的趋势,表明适量增施氮肥可提高大麦叶片光合作用,从而促进籽粒灌浆,但过量施氮会抑制其光合作用。叶绿素荧光参数能充分反映叶片对光能的吸收、传递、分配、耗能的效率<sup>[19]</sup>,被广泛用于植物光合作用研究<sup>[20]</sup>。张元帅等<sup>[21]</sup>认为,增施氮肥提高了小麦开花期叶片的 Fv/Fm 和 qP,表明增施氮肥有利于增强小麦叶片对光能的捕获能力。本研究中 2 个品种大麦叶片的 Fo、Fm、Fv/Fm、qP 均随施氮水平的升高呈先上升后下降的趋势,与前人研究结果不同,这可能是由于不同作物、地理环境等所致。

氮肥对麦类作物氮肥利用效率及产量影响较大,苏丙华等<sup>[22]</sup>研究发现,随施氮量的增加,小麦籽粒产量呈增加趋势,氮肥农学利用率、氮肥生产效率和氮肥吸收效率均降低。张美微等<sup>[23]</sup>研究结果显示,增施氮肥虽可显著提高小麦产量,但降低了氮肥偏生产力和氮肥农学利用率。杨显梅等<sup>[24]</sup>研究表明,适宜增施氮肥可显著增加小麦籽粒产量的同时,降低了氮肥吸收利用率、氮肥偏生产力和氮肥农学利用率。表明增施氮肥虽然可提高麦类作物产量,但却降低了其氮肥利用效率。本研究结果与前人基本一致,2 个大麦品种的产量均随施氮量的增加而增加,氮肥生产效率和氮肥生理效率均随施氮量的增加呈先降低后升高的趋势,氮肥农学效率和氮肥偏生产力则呈下降趋势。

作物不同品种间的光合特性和氮营养特性存在

广泛的基因型差异<sup>[25]</sup>,不同氮效率品种的光合性能、氮素转移和利用效率不同。研究表明,氮高效型小麦开花期旗叶的叶绿素含量和净光合速率均高于氮低效型<sup>[26]</sup>。有研究显示,无论是低氮条件下还是高氮条件下,氮高效玉米品种的光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度均高于氮低效型<sup>[27]</sup>。也有研究表明,氮高效基因型水稻的 Fv/Fm 略大于氮低效基因型水稻, Fv/Fo 极显著大于氮低效基因型,氮高效基因型水稻 PS II 实际光化学效率(ΦPS II)、qP 和 qN 极显著大于氮低效基因型水稻。说明氮高效基因型水稻与氮低效基因型水稻相比,具有更大的光能转化为电化学能的潜力。魏海燕<sup>[28]</sup>研究发现,氮高效型水稻品种灌浆期的茎叶氮素转移量和转移率均高于氮低效型,转移的氮对籽粒的贡献率低于氮低效品种。说明氮高效品种在抽穗以后,仍然具有较强的氮素积累能力。本研究结果显示,蒙啤 3 号的光合性能指标、叶片和茎秆氮素转运率及其对籽粒的贡献率、NAG、PFP 和产量均高于垦啤 7 号,花后氮素积累率及其对籽粒贡献率均为垦啤 7 号大于蒙啤 3 号,叶片和茎秆氮素转运率、NGPE、NPE 无显著差异,表明在此研究中无论施氮与否,蒙啤 3 号整体表现均优于垦啤 7 号。

作物氮素利用效率与光合性状存在较密切的关系<sup>[29]</sup>。光合作用的降低伴随着氮代谢的降低<sup>[30]</sup>。丁锦峰等<sup>[31]</sup>研究表明,小麦灌浆期间 SPAD 值、净光合速率与氮肥利用率相关性均达极显著水平。曾建敏等<sup>[32]</sup>研究发现,水稻氮肥偏生产力、氮肥农学利用率及氮素生理利用率与 Pn 呈显著正相关。魏海燕等<sup>[3]</sup>研究认为,水稻的氮肥利用效率与剑叶中叶绿素含量、净光合速率和叶绿素荧光动力学参数值(Fv/Fm、Fv/Fo、ΦPS II、qP、qN)呈极显著正相关。朱敏等<sup>[33]</sup>研究结果表明,紫玉米灌浆期间 SPAD 值与氮素利用效率和产量呈极显著正相关,开花期的 Pn 与氮素利用效率和产量呈极显著正相关,叶绿素荧光参数 Fv/Fm 与氮素利用效率和产量呈显著负相关。这些研究表明,光合性能各项指标对作物产量及氮高效利用有很大贡献。本研究结果显示,各项光合性能指标与产量均呈极显著正相关,Chl、Gs、Fv/Fm 与 NAE 呈正相关,Fv/Fm 与 PFP 呈正相关,其余各项光合性能指标与氮肥利用效率均呈负相关,与前人研究有所不同。

合理施氮能够增强大麦开花期叶片光合性能、产量和花后氮素积累率及其对籽粒贡献率,但却会降低氮肥利用效率。本研究蒙啤 3 号和垦啤 7 号均在 N<sub>2</sub>(180 kg/hm<sup>2</sup>) 水平下,光合性能、产量和花后

氮素积累率及其对籽粒贡献率达到最大值,是其最佳施氮量。由于大麦对氮素的适应性是一个复杂的性状,不同品种对氮肥的适应机制存在差异,在本研究中,蒙啤 3 号对氮肥响应能力强,光合性能强,转运的氮素对籽粒贡献率高,氮肥利用效率也相对较高。

#### 参考文献:

- [1] 卢良恕. 中国大麦学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.  
Lu L S. Barley in China[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1995.
- [2] 赵满兴, 周建斌, 杨绒, 郑险峰, 翟丙年, 李生秀. 不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素累积、运输和分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2): 143 - 149. doi:10.3321/j.issn:1008-505X.2006.02.001.  
Zhao M X, Zhou J B, Yang R, Zheng X F, Zhai B N, Li S X. Characteristics of nitrogen accumulation, distribution and translocation in winter wheat on dryland[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(2): 143 - 149.
- [3] 魏海燕, 张洪程, 马群, 戴其根, 霍中洋, 许珂, 张庆, 黄丽芬. 不同氮肥利用效率水稻基因型剑叶光合特性[J]. 作物学报, 2009, 35(12): 2243 - 2251. doi:10.3724/SP.J.1006.2009.02243.  
Wei H Y, Zhang H C, Ma Q, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Zhang Q, Huang L F. Photosynthetic characteristics of flag leaf in rice genotypes with different nitrogen use efficiencies[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(12): 2243 - 2251.
- [4] 高素玲, 苗丰, 陈建辉, 信龙飞, 邵瑞鑫. 氮素水平对旱作小麦光合特性的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(4): 169 - 173. doi:10.3969/j.issn.1000-7091.2013.04.031.  
Gao S L, Miao F, Chen J H, Xin L F, Shao R X. Effects of nitrogen levels on photosynthetic characteristics of *Triticum aestivum* L. in dry farmland[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, 28(4): 169 - 173.
- [5] 张如标, 王蓓蓓, 丁焕新, 周为华, 王君婵, 韩浩, 朱新开. 氮肥对耐盐啤酒大麦产量、品质及光合功能的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(1): 162 - 168. doi:10.7606/j.issn.1009-1041.2013.01.028.  
Zhang R B, Wang B B, Ding H X, Zhou H W, Wang J C, Han H, Zhu X K. Effects of nitrogen application amount and ratio on yield, quality and photosynthetic function of malt in barley[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(1): 162 - 168.
- [6] 蔡剑, 邹薇, 陈和, 沈会权, 戴廷波, 荆奇, 曹卫星, 姜东. 施氮水平对啤酒大麦叶片光合 SPAD 和叶绿素荧光特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(1): 97 - 101.  
Cai J, Zou W, Chen H, Shen H Q, Dai T B, Jing Q, Cao W X, Jiang D. Effects of different nitrogen levels on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence of leaves in malting barley[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27(1): 97 - 101.
- [7] 徐寿军, 包海柱, 张凤英, 刘志萍, 杨恒山, 许如根, 庄恒扬. 施肥水平对冬大麦干物质和氮素积累与转运的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(8): 1183 - 1189.



- Xu S J, Bao H Z, Zhang F Y, Liu Z P, Yang H S, Xu R G, Zhuang H Y. Effects of nitrogen application rates on dry matter, nitrogen accumulation and transformation in barley [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2012, 26(8): 1183 - 1189.
- [8] 徐寿军, 刘志萍, 张凤英, 杨恒山, 许如根, 庄恒扬. 氮肥水平对冬大麦产量、品质和氮肥利用效率的影响及其相关分析[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2012, 33(1): 66 - 71.
- Xu S J, Liu Z P, Zhang F Y, Yang H S, Xu R G, Zhuang H Y. Effect of nitrogen application rate on yield, quality and fertilizer-nitrogen use efficiency and its correlation analysis in winter barley[J]. *Journal of Yangzhou University(Agricultural and Life Science Edition)*, 2012, 33(1): 66 - 71.
- [9] 谷洁, 高华. 提高化肥利用率技术创新展望[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(2): 17 - 20. doi:10.3321/j.issn:1002-6819.2000.02.005.
- Gu J, Gao H. Prospects of the technical innovation to increase fertilizer use efficiency [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(2): 17 - 20.
- [10] 蔡祖聪, 颜晓云, 朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 1 - 6. doi:10.11674/zwyf.2014.0101.
- Cai Z C, Yan X Y, Zhu Z L. A great challenge to solve nitrogen pollution from intensive agriculture[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(1): 1 - 6.
- [11] 徐寿军, 张凤英, 刘志萍, 郭萍, 道日娜, 李琲琲, 王磊, 李国兴, 薛海楠. 播种期和氮肥用量对春大麦灌浆期籽粒蛋白质和游离氨基酸含量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(12): 1611 - 1618. doi:10.7606/j.issn.1009-1041.2017.12.12.
- Xu S J, Zhang F Y, Liu Z P, Guo P, Dao R N, Li B B, Wang L, Li G X, Xue H N. Effects of sowing date and nitrogen application on grain protein content and free amino acid content during grain filling in spring barley [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(12): 1611 - 1618.
- [12] 赵世杰, 史国安, 董新纯. *植物生理学试验指导*[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002: 55 - 57.
- Zhao S J, Shi G A, Dong X C. *Techniques of plant physiological experiment*[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2002: 55 - 57.
- [13] 李合生. *植物生理生化实验原理和技术*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 115 - 123.
- Li H S. *Principles and techniques of plant physiology and biochemistry experiments*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 115 - 123.
- [14] Hikosaka K. Interspecific difference in the photosynthesis-nitrogen relationship: patterns, physiological causes and ecological importance [J]. *Journal of Plant Research*, 2004, 117: 481 - 494. doi:10.1007/s10265-004-0174-2.
- [15] 薛崧, 吴小平, 冯彩平, 张倩. 不同氮素水平对旱地小麦叶片叶绿素和糖含量的影响及其与产量的关系[J]. *干旱地区农业研究*, 1997, 15(1): 82 - 87.
- Xue S, Wu X P, Feng C P, Zhang Q. Effects of N fertilizer on the amount of chlorophyll and carbohydrate in dryland wheat leaf and the relationship between N fertilizer and wheat yield[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1997, 15(1): 82 - 87.
- [16] 马建辉, 张利霞, 姜丽娜, 王亚帆, 齐冰玉, 李春喜. 氮肥和密度对冬小麦光合生理和物质积累的影响[J]. *麦类作物学报*, 2015, 35(5): 674 - 680. doi:10.7606/j.issn.1009-1041.2015.05.015.
- Ma J H, Zhang L X, Jiang L N, Wang Y F, Qi B Y, Li C X. Effect of nitrogen and density on photosynthetic physiology and matter accumulation of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(5): 674 - 680.
- [17] 王宁, 刘义国, 张洪生, 李玲燕, 林琪. 氮肥与精量秸秆还田对冬小麦花后光合特性及产量的影响[J]. *华北农学报*, 2012, 27(6): 185 - 190. doi:10.3969/j.issn.1000-7091.2012.06.036.
- Wang N, Liu Y G, Zhang H S, Li L Y, Lin Q. Effects of coupling of precise straw-return and nitrogen fertilizer on photosynthetic characteristics after anthesis and yield of winter wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2012, 27(6): 185 - 190.
- [18] 吴晓丽, 李朝苏, 汤永禄, 刘于斌, 李伯群, 樊高琼, 熊涛. 氮肥运筹对小麦产量、氮素利用效率和光能利用率的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(6): 1889 - 1898. doi:10.13287/j.1001-9332.201706.008.
- Wu X L, Li C S, Tang Y L, Liu Y B, Li B Q, Fan G Q, Xiong T. Effect of nitrogen management modes on grain yield, nitrogen use efficiency and light use efficiency of wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6): 1889 - 1898.
- [19] Ptushenko V V, Ptushenko O S, Tikhonov A N. Chlorophyll fluorescence induction, chlorophyll content, and chromaticity characteristics of leaves as indicators of photosynthetic apparatus senescence in arboreal plants [J]. *Biochemistry*, 2014, 79(3): 260 - 272. doi:10.1134/S0006297914030122.
- [20] Funk J L, Cornwell W K. Leaf traits within communities: context may affect the mapping of traits to function [J]. *Ecology*, 2013, 94(9): 1893 - 1897. doi:10.1890/12-1602.1.
- [21] 张元帅, 冯伟, 张海艳, 齐双丽, 衡亚蓉, 郭彬彬, 李晓, 王永华, 郭天财. 遮阴和施氮对冬小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(9): 1177 - 1184. doi:10.13930/j.cnki.cjca.160207.
- Zhang Y S, Feng W, Zhang H Y, Qi S L, Heng Y R, Guo B B, Li X, Wang Y H, Guo T C. Effects of shading and nitrogen rate on photosynthetic characteristics of flag leaves and yield of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(9): 1177 - 1184.
- [22] 苏丙华, 徐炜, 张娟, 武军华, 商涛. 施氮量对超高产小麦品种济麦 22 号产量和氮素利用效率的影响[J]. *山东农业科学*, 2012, 44(8): 78 - 80.
- Su B H, Xu W, Zhang J, Wu J H, Shang T. Effects of nitrogen application rate on yield and nitrogen use efficiency of super high-yield wheat variety Jimai 22 [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2012, 44(8): 78 - 80.
- [23] 张美微, 谢旭东, 王晨阳, 马耕, 卢红芳, 周国勤, 谢迎新, 马冬云. 不同生态条件下品种和施氮量对冬小麦产量及氮肥利用效率的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(10): 1362 - 1368. doi:10.7606/j.issn.1009-1041.2016.10.14.

- Zhang M W, Xie X D, Wang C Y, Ma G, Lu H F, Zhou G Q, Xie Y X, Ma D Y. Effect of cultivar and nitrogen fertilizer application on grain yield and nitrogen use efficiency of wheat at different planting environments [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(10): 1362–1368.
- [24] 杨显梅, 李广, 闫丽娟, 陈国鹏, 马维伟. 施氮对土壤矿质氮、小麦氮素吸收及产量的影响[J]. 分子植物育种, 2019, 17(23): 7942–7948. doi:10.13271/j.mpb.017.007942.
- Yang X M, Li G, Yan L J, Chen G P, Ma W W. Effects of nitrogen application on soil mineral nitrogen, N uptake of wheat [J]. *Molecular Plant Breed*, 2019, 17(23): 7942–7948.
- [25] 安久海, 刘晓龙, 徐晨, 崔菁菁, 徐克章, 凌凤楼, 张治安, 武志海. 氮高效水稻品种的光合生理特性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 29–38, 45. doi:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.12.003.
- Aa J H, Liu X L, Xu C, Cui J J, Xu K Z, Ling F L, Zhang Z A, Wu Z H. Photosynthetic physiological characteristics of rice varieties with high nitrogen use efficiencies [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(12): 29–38, 45.
- [26] 张旭, 田中伟, 胡金玲, 修明, 姜东, 戴廷波. 小麦氮素高效利用基因型的农艺性状及生理特性[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(10): 1315–1322. doi:10.7606/j.issn.1009-1041.2016.10.07.
- Zhang X, Tian Z W, Hu J L, Xiu M, Jiang D, Dai T B. Agronomic and physiological characteristics of high efficient nitrogen utilization in wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(10): 1315–1322.
- [27] 崔文芳, 高聚林, 屈佳伟, 于晓芳, 胡树平, 苏治军, 王志刚, 孙继颖, 谢岷. 氮高效玉米杂交种穗三叶氮积累及生理特性对氮效率的贡献[J]. 玉米科学, 2015, 23(5): 75–82. doi:10.13597/j.cnki.maize.science.20150513.
- Cui W F, Gao J L, Qu J W, Yu X F, Hu S P, Su Z J, Wang Z G, Sun J Y, Xie M. Contribution of nitrogen efficient maize hybrid spike 3 leaf nitrogen accumulation and physiological characteristics to the nitrogen efficiency [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(5): 75–82.
- [28] 魏海燕. 水稻氮素利用的基因型差异与生理机理研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2008. doi:10.7666/d.y1261720.
- Wei H Y. Genotypic differences of nitrogen use efficiencies and physiological mechanism in rice [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2008.
- [29] Nghiem Tien Chung, 江立庚, 孔飞扬, Bui Ngoc Anh. 不同薏苡品种光合特性及其与氮素利用效率的关系[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(11): 31–39. doi:10.11841/j.issn.1007-4333.2018.11.03.
- Nghiem T C, Jiang L G, Kong F Y, Bui T A. Photosynthetic characteristics and its relationship with nitrogen utilization efficiency of different coix cultivars [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(11): 31–39.
- [30] Wu P, Tao Q N. Genotypic response and selection pressure on nitrogen-use efficiency in rice under different nitrogen regimes [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1995, 18(3): 487–500. doi:10.1080/01904169509364917.
- [31] 丁锦峰, 成亚梅, 黄正金, 李春燕, 郭文善, 朱新开. 稻茬小麦不同氮效率群体花后物质生产与衰老特性差异分析[J]. 中国农业科学, 2015, 48(6): 1063–1073. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2015.06.03.
- Ding J F, Cheng Y M, Huang Z J, Li C Y, Guo W S, Zhu X K. Difference analysis of post-anthesis matter production and senescence characteristics among different nitrogen efficiency populations in wheat following rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(6): 1063–1073.
- [32] 曾建敏, 崔克辉, 黄见良, 贺帆, 彭少兵. 水稻生理生化特性对氮肥的反应及与氮利用效率的关系[J]. 作物学报, 2007(7): 1168–1176. doi:10.3321/j.issn:0496-3490.2007.07.019.
- Zeng J M, Cui K H, Huang J L, He F, Peng S B. Responses of physio-biochemical properties to N-fertilizer application and its relationship with nitrogen use efficiency in rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007(7): 1168–1176.
- [33] 朱敏, 史振声, 李凤海. 氮素对不同基因型紫玉米光合特性及氮素利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2016, 25(9): 1319–1326. doi:10.7606/j.issn.1004-1389.2016.09.007.
- Zhu M, Shi Z S, Li F H. Effects of nitrogen on photosynthetic characteristics and nitrogen utilization efficiency of different genotype purple corn [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2016, 25(9): 1319–1326.