

氮肥对糜子籽粒灌浆期农田小气候及产量的调控效应

官香伟¹ 韩浩坤¹ 张大众¹ 李境¹ 王孟² 薛志和²
高小丽¹ 杨璞¹ 冯佰利^{1*}

(1. 西北农林科技大学 农学院/旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 榆林市农业科学研究院 小杂粮研究所, 陕西 榆林 719000)

摘要 为研究旱地条件下氮肥对糜子灌浆期农田小气候、植株光合特性及产量的影响,以榆糜2号为试验材料,在陕西榆林小杂粮示范基地设置4个氮肥处理,分析糜子灌浆期农田小气候指标、光合生理指标及产量构成要素。试验结果表明,与不施肥对照相比,氮肥处理显著降低糜子株间光照度和株间气温,减少漏光损失的同时又增加株间相对湿度;整个籽粒灌浆期,随着氮肥水平的提高,糜子不同节位叶片的叶绿素相对含量(SPAD)和净光合速率(P_n)均呈增加趋势。其中,以N4处理(纯氮195 kg/hm²)对糜子籽粒灌浆期农田小气候特性及光合特性的影响最大。N3处理(纯氮150 kg/hm²)的糜子产量可达到4 605.8 kg/hm²,比对照增加了44.7%,是该地区糜子生产适宜的施氮量。

关键词 糜子; 氮肥; 籽粒灌浆期; 农田小气候; 光合特性

中图分类号 S162.4; S516

文章编号 1007-4333(2017)12-0010-10

文献标志码 A

Effects of nitrogen fertilizers on the field microclimate and yield of broomcorn millet at grain filling stage

GONG Xiangwei¹, HAN Haokun¹, ZHANG Dazhong¹, LI Jing¹, WANG Meng²,
XUE Zhihe², GAO Xiaoli¹, YANG Pu¹, FENG Baili^{1*}

(1. College of Agronomy/State Key Laboratory of Crop Stress Biology for Arid Areas,

Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Minor Grain Crops, Yulin Academy of Agricultural Sciences, Yulin 719000, China)

Abstract A broomcorn millet variety Yumi 2 was used as study object in test base of Yulin Shaanxi to investigate the effects of nitrogen fertilizers on the field microclimate, photosynthetic characteristics and yield of broomcorn millet at the grain filling stage. The results showed that: Compared with the non-fertilization treatment; Nitrogen fertilizer treatments significantly decreased illumination and air temperature, but improved the relative humidity among broomcorn millet plants. With the increase of the fertilizer level, both chlorophyll content (SPAD) and net photosynthetic rate (P_n) of different leaf sites of node showed an increasing trend at the grain filling stage. Among all fertilizer treatments, N4 (N 195 kg/hm²) displayed the greatest effect on the field microclimate and photosynthetic characteristics of broomcorn millet. And the yield of broomcorn millet reached 4 605.8 kg/hm² under N3 (N 150 kg/hm²) treatment, which increased 44.7% than that under non-fertilization treatment indicating the amount of nitrogen applied was suitable in Yulin, Shaanxi.

Keywords broomcorn millet; nitrogen fertilizers; grain filling stage; field microclimate; photosynthetic characteristics

收稿日期: 2016-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(31371529); 国家谷子高粱产业技术体系(CARS-13.5-07-A9); 国家“十二五”科技支撑计划(2014BAD07B03); 陕西省小杂粮产业技术体系项目(2017)

作者简介: 官香伟, 硕士研究生, E-mail: gxw199308@163.com

通讯作者: 冯佰利, 教授, 主要从事作物高产生态生理技术及小杂粮栽培、育种研究, E-mail: 7012766@163.com

作物的生长与环境条件关系密切,光、温、水、气影响作物的产量和品质。农田小气候一般是指作物地上部分和地下根系生活环境的小气候^[1],可调节作物的光合作用、物质转运和生理代谢^[2-3]。冠层温度、光照度、株间气温和株间相对湿度是衡量农田小气候的有效指标,对作物产量形成起着重要的作用。邓强辉等^[4]研究表明,冠层温度影响作物籽粒灌浆的生理生化过程,较低的冠层温度促进植株碳氮代谢和籽粒的灌浆充实,有利于产量的提高。陈洁等^[5]发现,随着光照度的增加,不结球白菜的产量显著提高。严菊芳等^[6]指出,冷型小麦较低的株间气温促进绿叶期的延长,延缓了后期早衰,提高了小麦的千粒重和产量。李云^[7]研究表明,在绿豆开花结荚期间,高产绿豆品种在离地面 5 和 20 cm 高度以及植株冠顶处的株间相对湿度均高于低产品种。孙淑娟等^[8]曾对冬小麦进行农田小气候的研究,发现在较低的空气温度影响下,冬小麦群体的株间相对湿度比较大,并促进了产量的增加。由此可见,农田小气候变化对提高作物产量具有重大的影响。

施用氮肥是农业生产中重要的增产措施,氮肥基施是确保作物高产的前提^[9]。彭小光等^[10]研究表明,水稻的施氮量越多,其植株冠层温度和株间气温与对照的差异越大。勾玲等^[11]认为,适量追施氮肥可以改善棉花叶片光合性能,提高植株生育后期叶片叶绿素含量和光合速率,延缓叶片衰老,保证了棉花生育后期光合产物的形成。周江明等^[12]研究指出,施氮与水稻的产量和产量构成因素呈抛物线

关系,即在一定程度上,氮肥可提高水稻植株穗长、穗分枝和穗数等相关指标,进而提高产量。但当施氮量超过一定范围,作物产量不增反减^[13-14]。因此,合理科学的施氮是提高作物产量的必要条件。

糜子(*Panicum miliaceum* L.)属于小宗作物,水分利用效率高、抗逆性强,在干旱响应^[15]、种植模式^[16]和覆盖方式^[17-18]等方面已有相关研究,但有关肥料利用率的研究较少^[19]。灌浆期是糜子产量形成的关键期^[20],维持灌浆期糜子农田小气候特性对获得高产具有重要价值。综上,前人关于氮肥对甜菜^[21]、水稻^[22]和小麦^[23]等农田小气候影响的报道较多,但有关糜子高产群体冠层结构特征及群体生理研究鲜见研究。因此,本试验通过设置不同的氮肥水平,研究氮肥对糜子灌浆期农田小气候特性及产量的影响,以期探讨糜子高产群体结构特征,为高效施用氮肥和糜子高产栽培提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

榆林小杂粮试验示范基地(37°56'26"N, 109°21'46"E,海拔 1 229 m)属黄土高原丘陵沟壑区,年降水量 400 mm 左右,集中在 7—9 月,约占全年降水量的 61%。试验区属典型的干旱半干旱大陆性季风气候,年均气温为 11.0 °C,最高气温 36.3 °C,最低气温 -25.7 °C。试验地土壤为黄绵土,地势平坦、肥力均匀,0~20 cm 耕层土壤基本养分状况如表 1。

表 1 试验田 0~20 cm 耕层土壤基本养分状况

Table 1 Soil nutrient status at 0—20 cm layer of experimental plot

项目 Item	速效氮/(mg/kg) Available N	速效磷/(mg/kg) Available P	速效钾/(mg/kg) Available K	pH	有机质/(g/kg) Organic matter
含量 Content	34.8	39.9	221.1	8.6	0.6

1.2 试验设计

共设置 4 种氮肥处理,分别为纯氮 60(N1)、105(N2)、150(N3)和 195 kg/hm² (N4)(折合成含氮 46.7%的尿素为 129、225、321 和 417 kg/hm²),以不施肥为对照(CK)。随机区组排列,3 次重复。小区面积 15 m² (3.0 m×5.0 m),行距 0.33 m,种植行数为 9 行,选用当地主栽品种榆糜 2 号(侧穗型粳性)。2015 年 6 月 12 日播种,9 月 21 日成熟。按照国家糜子品种区域试验要求进行田间管理。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 农田小气候特征

于晴天 13:00—14:00 进行农田小气候测定。按照往返观测法,冠层温度采用北京益康农科技公司生产的 ECA-YH01 红外测温仪进行测定。株间气温和相对湿度采用天津市风洋仪器仪表工贸有限公司生产的 DHM2 型通风干湿表观测,光照度采用上海市嘉定学联仪表厂生产的 ZDS-10 型号照度计进行观测,测定部位为糜子群体内距地面 5 cm、

20 cm 以及 2/3 株高和冠顶,测定时期为糜子籽粒灌浆期。

1.3.2 光合特性

于灌浆期在各处理小区内选取有代表性的 5 株糜子,采用日本生产的 SPAD-502 叶绿素测定仪测定旗叶、倒二叶和倒三叶叶绿素相对值,测定时,避开叶脉位置,测定叶片的上、中、下部位,求其平均值,即代表该叶片的叶绿素相对值。同时选择生长一致的 3 株糜子,用美国生产的 Li-6400 便携式光合测定系统测定主茎上旗叶、倒二叶和倒三叶的净光合速率(P_n)。时间为晴天 8:30—11:00,按照田间种植顺序进行往返测定。

1.3.3 产量及构成因素

于成熟期,取 15 株,测定每株穗长、茎粗、穗数和千粒重,计算其平均值。另外,将每个处理的 3 个小区中的有效穗数全部收回,并折算成公顷产量。

1.4 数据处理

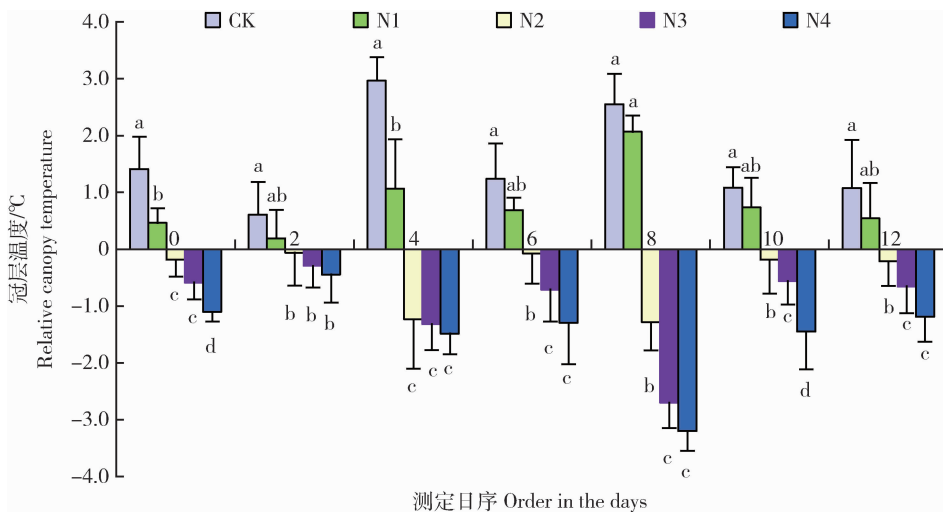
试验数据采用 Excel 2010 进行录入、整理和图表的制作,用 SPSS 19.0 进行方差和相关分析。

2 结果与分析

2.1 氮肥对糜子灌浆期农田小气候特征的影响

2.1.1 冠层温度

以观测日序为横坐标,各个施肥水平下冠层温度的平均值为基准,依据测定日序将各氮肥处理与平均值的冠层温度差绘制出不同施肥水平下糜子群体相对冠层温度的变化图。由图 1 可知,不同施肥水平下糜子籽粒灌浆期的相对冠层温度存在差异,由高到低依次为:CK>N1>N2>N3>N4,与 CK 相比,在测定日序 0 d 的情况下,各施肥梯度处理的冠层温度依次降低了 2.4%、4.0%、5.0%和 6.3%,并且 N4 处理的冠层温度与 CK 之间差异达到显著水平。



CK, 对照; N1, 60 kg/hm²; N2, 105 kg/hm²; N3, 150 kg/hm²; N4, 195 kg/hm²。同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平。下同。

CK, Control; N1, 60 kg/hm²; N2, 105 kg/hm²; N3, 150 kg/hm²; N4, 195 kg/hm². Values followed by different small letters in same column mean significant at the 5% levels. The same below.

图 1 不同氮肥水平下糜子灌浆期群体相对冠层温度的变化

Fig. 1 Changes on the relative canopy temperature at grain filling stage of broomcorn millet under different N fertilizer treatments

2.1.2 株间光照度

作物群体内光捕获能力和光照度直接影响作物的光合作用及干物质的生产^[24]。在糜子农田环境中,由于无外界遮盖物影响,自然光垂直分布在植株 5 cm 处最弱,冠顶的光照强度最强。由图 2 可知,糜子同一高度处,不同施肥处理株

间光照度均呈下降的趋势。距离地面 20 cm 处, N1 处理的株间光照度比 CK 降低 8.4%, N4 处理的糜子株间光照度比 CK 降低 43.0%; 整个灌浆期内, N1、N2、N3 和 N4 处理下各高度株间光照度平均值比 CK 降低 6.5%、12.1%、14.9% 和 20.3%。

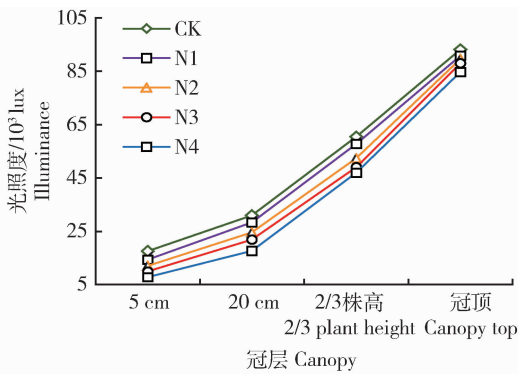


图 2 不同氮肥水平下糜子灌浆期株间光照度的变化

Fig. 2 Changes of different N fertilizer treatments on the illuminance variations of broomcorn millet at grain filling stage

2.1.3 株间气温

作物群体中的空气温度与其群体内的太阳辐射、乱流交换和蒸散状况有关^[25]。由图 3 可知,随着距地面高度增加,各施肥处理的株间气温均呈降低的趋势。不同施肥处理进行比较,同一高度株间气温表现为 $CK > N1 > N2 > N3 > N4$, 距离地面 20 cm 处, N1、N2、N3 和 N4 处理的糜子株间气温比 CK 降低了 1.2%、2.3%、3.0% 和 4.0%; 整个灌浆期内, N1、N2、N3 和 N4 处理下各高度株间气温平均值比 CK 降低 1.3%、2.2%、3.0% 和 4.0%, 并且各处理与 CK 之间均达到了显著水平。

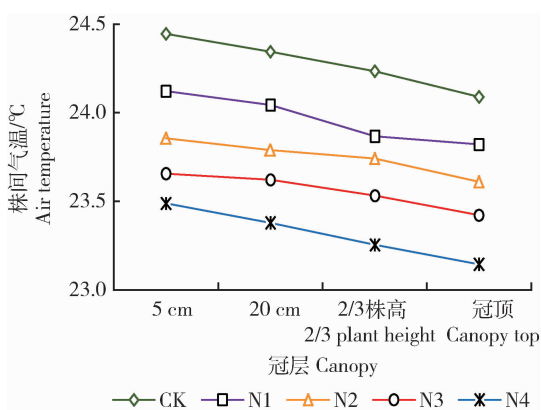


图 3 不同氮肥水平下糜子灌浆期株间气温的变化

Fig. 3 Changes on the air temperature variations at grain filling stage of broomcorn millet under different N fertilizer treatments

2.1.4 株间相对湿度

作物群体中的空气相对湿度主要由空气温度、农田蒸散和乱流交换强度决定^[26]。由图 4 可知,随

着距地面高度降低,各施肥处理下的株间相对湿度均呈增大的趋势。不同施肥水平间进行比较,各高度株间相对湿度在高氮肥处理下出现最高值,即表现为 $N4 > N3 > N2 > N1 > CK$, 2/3 株高处,随着肥力水平的增加,各处理的糜子株间相对湿度比 CK 提高了 1.2%、2.9%、3.7% 和 4.4%; 整个灌浆期内, N1、N2、N3 和 N4 处理下各高度株间相对湿度平均值比 CK 提高了 1.3%、3.2%、4.1% 和 5.3%, 并且 N4 处理的相对湿度与 CK 之间达到了显著水平。

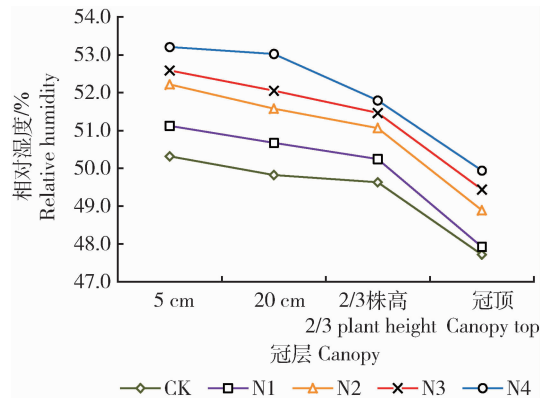


图 4 不同氮肥水平下糜子灌浆期株间相对湿度的变化

Fig. 4 Changes on the relative humidity variations of broomcorn millet at grain filling stage of broomcorn millet under different N fertilizer treatments

2.2 氮肥对糜子灌浆期不同节位叶片光合特性的影响

2.2.1 叶绿素含量

叶绿素是光合作用中将光能转变为化学能并用于物质合成的关键物质^[27]。由图 5 可知,糜子籽粒灌浆期不同节位叶片叶绿素含量存在差异,由高到低依次为:倒二叶 > 倒三叶 > 旗叶。各氮肥处理间,随着氮肥浓度的增加,相同节位叶片叶绿素含量呈上升的趋势。植株的倒二叶, N1、N2、N3 和 N4 处理的糜子叶片叶绿素含量比 CK 提高了 5.7%、9.7%、14.5% 和 16.8%, 各处理与 CK 之间达到了显著水平; 整个籽粒灌浆期内, N1、N2、N3 和 N4 处理下各节位叶片叶绿素含量平均值比 CK 提高了 6.2%、9.2%、12.0% 和 16.7%。

2.2.2 净光合速率

净光合速率是衡量植物光合作用强弱的主要生理指标之一,其速率的大小直接反映了叶片作为光合源制造光合产物以及输出光合产物到库的潜在能

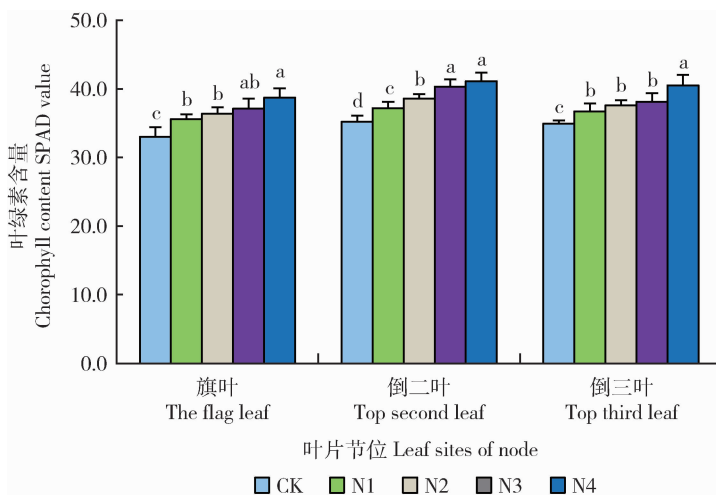


图5 氮肥对糜子灌浆期不同节位叶片叶绿素含量的影响

Fig. 5 Effects on the chlorophyll content in the leaves at different position of broomcorn millet at the grain filling stage of broomcorn millet under different N fertilizer treatments

力^[28]。由图6可知,糜子籽粒灌浆期不同节位叶片净光合速率存在差异,由高到低依次为:倒二叶>倒三叶>旗叶。各氮肥处理间,随着氮肥浓度的增加,相同节位叶片净光合速率呈上升的趋势。植株的倒三叶,N1、N2、N3和N4处理的糜子叶片净光合速

率比CK提高了11.1%、22.1%、27.8%和35.6%;整个灌浆期内,N1、N2、N3和N4处理下各节位叶片净光合速率平均值比CK提高了18.0%、27.0%、35.2%和43.8%,并且各氮肥处理与CK之间达到了显著水平。

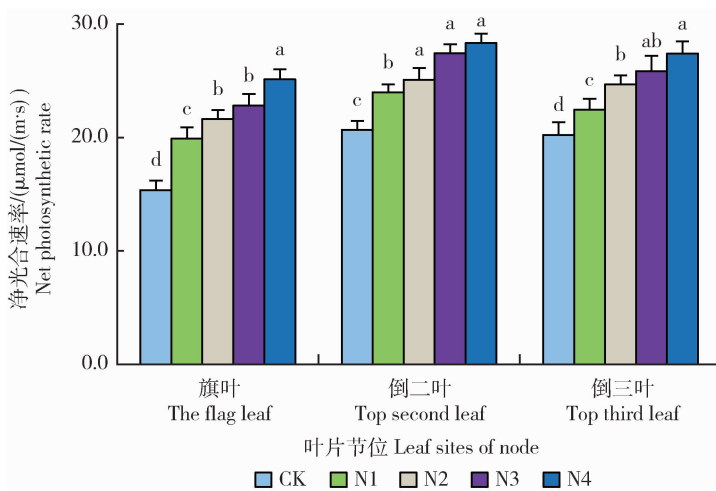


图6 氮肥对糜子灌浆期不同节位叶片净光合速率的影响

Fig. 6 Effects on the net photosynthesis rate in the leaves at different position of broomcorn millet at the grain filling stage of broomcorn millet under different N fertilizer treatments

2.3 氮肥对糜子产量及构成因素的影响

由表2可知,各氮肥处理下糜子的产量及构成因素存在显著差异。与CK相比,施肥处理下的糜子穗长、茎粗、单株穗数、千粒重以及产量普遍增加,

N1、N2、N3和N4处理的糜子千粒重分别比CK提高1.0%、1.8%、2.9%和1.7%,产量分别提高10.1%、29.7%、44.7%和36.0%,N3处理的糜子产量为最高,且N3处理与对照差异达到显著水平。

表 2 氮肥对糜子产量构成因素及产量的影响

Table 2 Effects of N fertilizer treatments on photosynthetic traits and field of broomcorn millet released

处理 Treatment	穗长/cm Spike length	茎粗/cm Stem diameter	单株穗数/个 Panicles	千粒重/g 1000-grain weight	产量/(kg/hm ²) Yield
CK	32.9±0.71 c	1.63±0.13 b	3.00±0.28 b	8.257±0.049 a	3 182.4±471.4 d
N1	34.0±1.35 bc	1.71±0.06 b	3.60±0.28 b	8.340±0.025 b	3 503.5±313.3 c
N2	35.3±0.37 ab	1.72±0.04 a	3.70±0.14 a	8.409±0.068 bc	4 127.8±294.6 b
N3	36.7±0.38 a	1.76±0.07 a	3.80±0.84 a	8.496±0.078 d	4 605.8±462.1 a
N4	35.5±1.51 ab	1.73±0.03 a	3.70±0.71 a	8.394±0.069 ab	4 327.9±100.7 b

注：同一列小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平。

Note: Values followed by different small letters in same column mean significant at the 5% levels.

2.4 糜子籽粒灌浆期农田小气候特征、光合特性及产量的相关性分析

由表 3 可见，糜子整个籽粒灌浆期，冠层温度、光照度和株间气温与产量及产量构成因素呈负相关。其

中冠层温度与千粒重和产量达到显著负相关；株间相对湿度、叶绿素含量和净光合速率与产量及产量构成因素呈正相关关系，其中相对湿度与产量达到显著正相关，叶绿素含量和净光合速率与产量达到极显著正相关。

表 3 糜子籽粒灌浆期农田小气候特征、光合特性与产量的相关性分析

Table 3 Correlation coefficients between field microclimate, photosynthetic characteristics and field of broomcorn millet at the seed-filling stage

指标 Index	穗长/cm Spike length	茎粗/cm Stem diameter	单株穗数/个 Panicles	千粒重/g 1 000-grain weight	产量/ (kg/hm ²) Field
冠层温度 Canopy temperature	-0.719	-0.852	-0.680	-0.976*	-0.956*
光照度 Illuminance	-0.534	-0.800	-0.473	-0.883	-0.838
株间气温 Air temperature	-0.588	-0.640	-0.577	-0.906	-0.902
相对湿度 Relative humidity	0.771	0.864	0.739	0.991**	0.978*
叶绿素含量 Leaf greenness	0.874	0.806	0.870	0.976*	0.991**
净光合速率 Net Photosynthetic rate	0.905	0.896	0.885	0.993**	0.997**

注：*，在 0.05 水平上显著相关；**，在 0.01 水平上显著相关。

Note: * ,significance at 0.05 level; ** ,significance at 0.01 level.

3 讨论

农田小气候是以农作物为基础的一种特殊小气候，它是作物群体中接近地面的空气层、土壤耕作层

和作物冠层群体之间相互作用而形成的^[29-30]。作物群体内的冠层温度、株间光照度、株间气温及株间相对湿度对作物生长发育和产量的形成起着重要的作用。本试验中，增施氮肥可改变糜子籽粒灌浆期的

冠层温度,氮肥处理使糜子群体的株间光照度和株间气温显著降低,同时提高株间相对湿度,高氮肥处理下的糜子农田小气候特性与对照均达到显著水平,这与前人的研究结果基本一致^[31]。另外,糜子籽粒灌浆期的冠层温度、光照度和株间气温与产量及产量构成因素呈负相关关系,冠层温度与其达到显著负相关,这与周春菊等^[32]在小麦上的研究结果相近。闫川等^[33]研究表明,水稻群体内部的冠层温度和光照度随着水稻穗肥水平的提高而降低,株间相对湿度随水稻穗肥水平的提高而升高。生态机理可能是由于较高的施肥量引起糜子叶片蒸腾加快,使群体代谢加强,最终导致穗叶和冠层的温度较低^[34]。本研究结果表明施肥量能够塑造糜子群体农田小气候特征,改善通风透光能力,促进了作物籽粒的灌浆过程。

光合作用是作物产量形成的基础,良好的冠层结构是提高产量的前提^[35]。同时,肥水条件也制约着作物光合能力的强弱^[36-37]。吕丽华等^[38]指出,氮是维持植株叶片叶绿素含量及延长叶片功能期的重要矿质元素,适量的氮肥能够提高夏玉米不同层次叶片的净光合速率。Cai等^[39]研究表明,在小麦灌浆期,随着施氮量的增加,大大提高了小麦叶片的叶绿素含量,促进了CO₂的吸收,增强了叶片的净光合速率和气孔导度。本研究发现,糜子灌浆期不同叶位叶片光合能力由高到低为倒二叶>倒三叶>旗叶;增施氮肥能够提高糜子灌浆期叶片的叶绿素含量和净光合速率,并且叶绿素和净光合速率与产量呈极显著正相关,这与前人的研究结果基本一致^[40-41]。说明氮肥能够改善植株叶片的光合性能,使其代谢能力增强,延缓叶片衰老,对作物产量的提高起着重要的作用。

合理的施氮量对作物具有明显的增产作用^[42-43]。葛均筑等^[44]研究表明,增施氮肥促进了春玉米生长发育,增加了穗粒数和千粒重,使春玉米籽粒产量提高6.80%~24.66%。Wang等^[45]指出,氮肥可使小麦的穗粒数、穗粒重、千粒重和产量提高26.8%、42.6%、15.4%和16.0%,并与对照达到显著水平。本试验中,施用氮肥可以提高糜子产量,但当氮肥水平超过150 kg/hm²时,产量不增却减,这与前人的研究结果类似^[46],并且相同的试验结果在大麦^[47]和玉米^[48]上得到了验证。表明氮肥施用量过低会达不到作物生长所需的营养需求,而过高会引起营养生长过快造成养分损失,导致生殖器官发

育所需的营养供应不足,最终产量下降^[49]。本试验条件下,150 kg/hm²的氮肥施用量可使糜子的产量达到4 605.8 kg/hm²,是陕西榆林地区糜子生产的适宜氮肥施用量。

参考文献 References

- [1] Guo Z, Liu H J, Yuan H Y, Yang G Y, Zheng J H, Chen L G. Insect-proof nets affect paddy field microclimate parameters and grain quality of different japonica rice varieties[J]. *Journal of Crop Science & Biotechnology*, 2015, 18(2): 73-81
- [2] Ardestani H G. Impact of regulated deficit irrigation on the physiological characteristics of two rapeseed varieties as affected by different potassium rates[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11(24): 6510-6519
- [3] Liu T D, Song F B. Maize photosynthesis and microclimate within the canopies at grain-filling stage in response to narrow-wide row planting patterns[J]. *Photosynthetica*, 2012, 50(50): 215-222
- [4] 邓强辉, 潘晓华, 石庆华. 作物冠层温度的研究进展[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(6): 1162-1165
Deng Q H, Pan X H, Shi Q H. Research advances on crop canopy temperature[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(6): 1162-1165 (in Chinese)
- [5] 陈洁, 徐海, 单奇伟, 安林海, 宋波, 陈龙正, 苏小俊, 袁希汉. 光照度、施肥量及品种互作对不结球白菜硝酸盐含量和产量的影响[J]. *江苏农业学报*, 2009, 25(4): 861-864
Chen J, Xu H, Shan Q W, An L H, Song B, Chen L Z, Su X J, Yuan X H. Effect of light intensity, fertilization amount and variety on nitrate content and yield of N on-heading Chinese cabbage[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2009, 25(4): 861-864 (in Chinese)
- [6] 严菊芳, 张高午. 不同温型小麦灌浆结实期农田热量平衡及其气象效应[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(9): 49-52
Yan J F, Zhang S W. Study on the heat balance and the meteorological effect during milk-filling and burliness stage of the different type wheat[J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2007, 35(9): 49-52 (in Chinese)
- [7] 李云. 不同产量水平绿豆生理特性及其农田小气候特征研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2013
Li Y. Study on physiological property and farmland microclimatic characteristic of different mung bean [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013 (in Chinese)
- [8] 孙淑娟, 周勋波, 陈雨海, 杨国敏, 徐德力, 杨荣光. 冬小麦种群不同分布方式对农田小气候及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(S2): 27-31
Sun S J, Zhou X B, Chen Y H, Yang G M, Xu D L, Yang R G. Effects of different distribution patterns of winter wheat

- population on farmland microclimate and yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24 (S2):27-31 (in Chinese)
- [9] Lorenz O A, Weir B L, Bishop J C. Effect of controlled release nitrogen fertilizers on yield and nitrogen absorption by potatoes, cantaloupes and tomatoes[J]. *Hong Kong Physiotherapy Journal*, 2015, 33(2):53-76
- [10] 彭小光. 不同施氮条件下水稻农田小气候温湿度变化研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007
- Peng X G. Studies on changes of temperature and humidity in Rice field microclimate under different N application [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2007 (in Chinese)
- [11] 勾玲, 闫洁, 韩春丽, 赵瑞海, 张旺锋, 杨新军. 氮肥对新疆棉花产量形成期叶片光合特性的调节效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(5):488-493
- Gou L, Yan J, Han C L, Zhao R H, Zhang W F, Yang X J. Effects of nitrogen rates on photosynthetic characteristics and yield of high yielding cotton in Xinjiang[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(5):488-493 (in Chinese)
- [12] 周江明, 赵琳, 董越勇, 徐进, 边武英, 毛杨仓, 章秀福. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2):274-281
- Zhou J M, Zhao L, Dong Y J, Xu J, Bian W Y, Mao Y C, Zhang X F. Nitrogen and transplanting density interactions on the rice yield and N use rate [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2):274-281 (in Chinese)
- [13] Wang Y C, Wang E, 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 Agroeco systems*, 2010, 86(1):105-119
- [14] 同延安, 赵营, 赵护兵, 樊红柱. 施氮量对冬小麦氮素吸收、转运及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(1):64-69
- Tong Y A, Zhao Y, Zhao H B, Fan H Z. Effect of N rates on N uptake, transformation and the yield of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(1):64-69 (in Chinese)
- [15] 张盼盼, 冯佰利, 王鹏科, 高金锋, 宋慧, 张小东, 柴岩. PEG胁迫下糜子苗期抗旱指标鉴定研究[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(1):53-59
- Zhang P P, Feng B L, Wang P K, Gao J F, Song H, Zhang X D, Chai Y. Study on identification of drought-resistance indexes at seedling stage in broomcorn millet under PEG stress [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(1):53-59 (in Chinese)
- [16] 崔雯雯, 宋全昊, 高小丽, 贾志宽. 糜子不同种植方式对土壤酶活性及养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1):234-240
- Cui W W, Song Q H, Gao X L, Jia Z K. Influence of different cropping patterns on soil enzyme activities and yield of broomcorn millet[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21(1):234-240 (in Chinese)
- [17] 苏旺, 张艳平, 屈洋, 李翠, 妙佳源, 高小丽, 刘建华, 冯佰利. 不同覆盖方式对黄土高原旱地土壤水分及糜子生长、光合特性和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(11):3215-3222
- Su W, Zhang Y P, Qu Y, Li C, Miao J Y, Gao X L, Liu J H, Feng B L. Effects of mulching patterns on soil water, broomcorn millet growth, photosynthetic characteristics and yield in the dryland of Loess Plateau in China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(11):3215-3222 (in Chinese)
- [18] 苏旺, 屈洋, 冯佰利, 柴岩. 沟垄覆膜集水模式提高糜子光合作用和产量[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(13):137-145
- Su W, Qu Y, Feng B L, Chai Y. Photosynthesis characteristics and yield of broomcorn millet under film mulching on ridge-furrow for harvesting rainwater model in semiarid region of Northern Shaanxi [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(13):137-145 (in Chinese)
- [19] 张美俊, 乔治军, 杨武德, 陈凌, 冯美臣. 糜子氮、磷、钾肥的效应及优化研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2):347-353
- Zhang M J, Qiao Z J, Yang W D, Chen L, Feng M C. Effect of N, P and K fertilizer application and optimum rate for yield of millet [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2):347-353 (in Chinese)
- [20] 张艳平, 苏旺, 高小丽, 雷锦银, 高金锋, 王鹏科, 冯佰利. 不同覆盖栽培糜子籽粒灌浆期淀粉酶活性变化[J]. *中国农业大学学报*, 2014, 19(1):51-58
- Zhang Y P, Su W, Gao X L, Lei J Y, Gao J F, Wang P K, Feng B L. Dynamic changes of starch synthesis enzymes activities of *Panicum miliaceum* L grain during the filling stage under different mulching cultivation [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(1):51-58 (in Chinese)
- [21] Malnou C S, Jaggard K W, Sparkes D L. A canopy approach to nitrogen fertilizer recommendations for the sugar beet crop[J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25(3):254-263 (in Chinese)
- [22] Zhong Y, Wang X, Yang J, Zhao X, Ye X. Exploring a suitable nitrogen fertilizer rate to reduce greenhouse gas emissions and ensure rice yields in paddy fields [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 565:420-426
- [23] Mon J, Bronson K F, Hunsaker D J, Thorp K R, White J W, French A N. Interactive effects of nitrogen fertilization and irrigation on grain yield, canopy temperature, and nitrogen use efficiency in overhead sprinkler-irrigated durum wheat [J]. *Field Crops Research*, 2016, 191:54-65
- [24] 马旭, 林超辉, 齐龙, 江立凯, 谭永妍, 梁仲维, 鹿芳媛. 不同光质与光照度对水稻温室立体育秧秧苗素质的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11):228-235
- Ma X, Lin C H, Qi L, Jiang L K, Tan Y X, Liang Z W, Lu F Y. Effect of different lighting quality and intensities on quality of rice seedling by greenhouse stereoscopic nursing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(11):228-235 (in Chinese)

- [25] 刘园,王颖,杨晓光.华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素[J].生态学报,2010,30(4):923-932
Liu Y, Wang Y, Yang X G. Trends in reference crop evapotranspiration and possible climatic factors in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 923-932 (in Chinese)
- [26] 楼靓珺,宋新山,赵晓祥.苗期大豆对土壤水分和空气湿度变化的生理生化响应[J].草业科学,2013,30(6):898-903
Lou L J, Song X S, Zhao X X. Response of physiology and biochemistry of soybean seedling to soil water deficit and air humidity[J]. *Pratacultural science*, 2013, 30(6): 898-903 (in Chinese)
- [27] 武文明,陈洪俭,李金才,魏凤珍,王世济,周向红.氮肥运筹对孕穗期受渍冬小麦旗叶绿素荧光与籽粒灌浆特性的影响[J].作物学报,2012,38(6):1088-1096
Wu W M, Chen H J, Li J L, Wei F Z, Wang S J, Zhou X H. Effects of nitrogen fertilization on chlorophyll fluorescence parameters of flag leaf and grain filling in winter wheat suffered waterlogging at booting stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(6): 1088-1096 (in Chinese)
- [28] Auzmendi I, Marsal J, Girona J, Lopez G. Daily photosynthetic radiation use efficiency for apple and pear leaves; Seasonal changes and estimation of canopy net carbon exchange rate[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 51(51): 1-8
- [29] 张盼盼.糜子农田小气候特征及生物学特性对施肥水平的响应[D].杨陵:西北农林科技大学,2013
Zhang P P. Response of field microclimate characteristics and biological properties of broomcorn millet to fertilization levels [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013 (in Chinese)
- [30] 王波,余海兵,支银娟.玉米不同种植模式对田间小气候和产量的影响[J].核农学报,2012,26(3):623-627
Wang B, Yu H B, Zhi Y J. Effect of different cropping patterns on field microclimate and yields of maize [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2012, 26(3): 623-627 (in Chinese)
- [31] 张盼盼,周瑜,宋慧,乔治军,王海岗,郑殿峰,冯佰利.不同肥力水平下糜子生长状况及农田小气候特征比较[J].应用生态学报,2015,26(2):473-480
Zhang P P, Zhou Y, Song H, Qiao Z J, Wang H G, Zheng D F, Feng B L. Comparison of growth and field microclimate characteristics of broomcorn millet under different fertilization conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(2): 473-480 (in Chinese)
- [32] 周春菊,张嵩午,王林权,苗芳.施肥对小麦冠层温度的影响及其与生物学性状的关联[J].生态学报,2005,25(1):18-22
Zhou C J, Zhang S W, Wang L Q, Miao F. Effect of fertilization on the canopy temperature of winter wheat and its relationship with biological characteristics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 18-22 (in Chinese)
- [33] 闫川,丁艳锋,王强盛,李刚华,刘正辉,缪小建,郑永美,魏广彬,王绍华.穗肥施量对水稻植株形态、群体生态及穗叶温度的影响[J].作物学报,2008,34(12):2176-2183
Yan C, Ding Y F, Wang Q S, Li G H, Liu Z H, Miu X J, Zheng Y M, Wei G B, Wang S H. Effect of panicle fertilizer application rate on morphological, ecological characteristics, and organ temperature of rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(12): 2176-2183 (in Chinese)
- [34] Prasad P V V, Boote K J, Allen L H, Sheehy J E, Thomas J M G. Species, ecotype and cultivar differences in spikelet fertility and harvest index of rice in response to high temperature stress [J]. *Field Crops Research*, 2006, 95(2-3): 398-411
- [35] Feng G, Luo H, Zhang Y, Gou L, Yao Y, Linb Y, Zhang W F. Relationship between plant canopy characteristics and photosynthetic productivity in diverse cultivars of cotton (*Gossypium hirsutum* L)[J]. *The Crop Journal*, 2016
- [36] Lombardo S, Pandino G, Mauromicale G. The nutraceutical response of two globe artichoke cultivars to contrasting NPK fertilizer regimes[J]. *Food Research International*, 2015, 76: 852-859
- [37] Yao H, Zhang Y, Yi X, Hu Y Y, Luo H H, Gou L, Zhang W F. Plant density alters nitrogen partitioning among photosynthetic components, leaf photosynthetic capacity and photosynthetic nitrogen use efficiency in field-grown cotton[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184(7): 39-49
- [38] 吕丽华,赵明,赵久然,陶洪斌,王璞.不同施氮量下夏玉米冠层结构及光合特性的变化[J].中国农业科学,2008,41(9):2624-2632
Lv L H, Zhao M, Zhao J R, Tao H B, Wang P. Canopy structure and photosynthesis of summer maize under different nitrogen fertilizer application rates [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(9): 2624-2632 (in Chinese)
- [39] Cai R G, Min Z, Yin Y P, Wang p, Zhang T B, Gu F, Dai Z M, Liang T B, Wu Y H, Wang Z L. Photosynthetic characteristics and antioxidative metabolism of flag leaves in responses to nitrogen application during grain filling of field-grown wheat [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(2): 157-167
- [40] 妙佳源.不同基因型糜子群体冠层特性研究[D].杨陵:西北农林科技大学,2016
Miao J Y. Analysis of canopy characteristics about different genotypes of proso millet [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016 (in Chinese)
- [41] 周瑜,苏旺,王舰,屈洋,高小丽,杨璞,冯佰利.不同覆盖方式和施氮量对糜子光合特性及产量性状的影响[J].作物学报,2016,42(6)
Zhou Y, Su W, Wang J, Qu Y, Gao X L, Yang P, Feng B L. Effects of Mulching and Nitrogen Application on Photosynthetic Characteristics and Yield Traits in Broomcorn Millet [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(6) (in Chinese)
- [42] Shaheen A, Ali S, Stewart B A, Naeem M A, Jilani G. Mulching and synergistic use of organic and chemical fertilizers enhances the yield, nutrient uptake and water use efficiency of sorghum

- [J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2010, 5(16): 2178-2183
- [43] Mukherjee A, Kundu M, Sarkar S. Role of irrigation and mulch on yield, evapotranspiration rate and water use pattern of tomato (*Lycopersicon esculentum* L) [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(1): 182-189
- [44] 葛均筑, 李淑娅, 钟新月, 袁国印, 徐莹, 田少阳, 曹凑贵, 翟中兵, 刘诗晴, 展茗, 赵明. 施氮量与地膜覆盖对长江中游春玉米产量性能及氮肥利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(6): 1081-1092
- Ge J Z, Li S Y, Zhong X Y, Yuan G Y, Xu Y, Tian S Y, Cao C G, Zhai Z B, Liu S Q, Zhan M, Zhao M. Effects of nitrogen application and film mulching on yield performance parameters and nitrogen use efficiency of spring maize in the middle reaches of Yangtze River [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(6): 1081-1092 (in Chinese)
- [45] Wang L F, Chen J, Shang guan Z P. Photosynthetic characteristics and nitrogen distribution of large-spike wheat in Northwest China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(3): 545-552
- [46] 王君杰, 曹晓宁, 陈凌, 王海岗, 刘思辰, 田翔, 秦慧彬, 杨光宗, 乔治军. 不同氮肥处理对糜子产量及品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(5): 30-33
- Wang J J, Cao X N, Chen L, Wang H G, Liu S C, Tian X, Qin H B, Yang G Z, Qiao Z J. Effects of different nitrogen fertilizers on the yield and quality of broomcorn millet [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(5): 30-33 (in Chinese)
- [47] Ghadiri H. Nitrogen and water use efficiencies and yield response of barley cultivars under different irrigation and nitrogen regimes in a semi-arid Mediterranean climate [J]. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 2014, 61(1): 15-32
- [48] Azizian A, Sepaskhah A R. Maize response to different water, salinity and nitrogen levels yield-water relation, water-use and water uptake reduction function [J]. *International Journal of Plant Production*, 2014, 8(2): 183-214
- [49] 王宇先, 李清泉, 刘玉涛, 连永利, 杨慧莹, 马波, 胡继芳, 闫峰, 兰红宇. 密度和施氮量对糜子产量及综合性状的影响[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(36): 188-194
- Wang Y X, Li Q Q, Liu Y T, Lian Y L, Yang H Y, Ma B, Hu J F, Yan F, Lan H Y. Effect of planting density and nitrogen fertilizer topdressing on yield character of broomcorn millet [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(36): 188-194 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅