

氮肥形态对不同持绿性玉米品种产量 及叶片光合氮素的影响

郭松¹, 周子军¹, 刘东瑶², 曾祥忠¹, 喻华¹, 陈尚洪¹, 何明江¹,
陈琨¹, 上官宇先¹, 涂仕华¹, 秦鱼生¹

(1. 四川省农业科学院农业资源与环境研究所, 成都 610066; 2. 四川省农业科学院, 成都 610066)

摘要: 以成单30(CD30)和正红505(ZH505)为试验材料, 研究在无氮(N1)和纯氮225 kg/hm²的NH₄Cl(N2)、KNO₃(N3)、尿素(N4)、猪粪(N5)等5种处理下的产量、氮效率以及花后叶片氮素的变化。结果表明, 氮肥显著影响玉米产量, 其变化为N4>N3>N2>N5>N1。品种间产量和吸氮量没有显著差异, ZH505的氮素收获指数显著高于CD30, CD30的保绿度显著高于ZH505。氮肥形态和品种显著影响Chla和Chlb的变化, 其中N4处理下含量最高, CD30显著高于ZH505。叶片氮浓度在花后20 d达到最高值, 两个品种在花后40 d的Chla和Chlb平均含量较花后20 d分别降低19.11%、13.63%和42.98%、36.31%。氮肥形态显著影响Rubisco和PEPC的变化, 其中N5处理显著高于N4处理。因此根据玉米品种持绿特性, 通过尿素和有机肥配合施用, 提高叶片光合氮素利用效率是实现玉米高产氮高效的途径。

关键词: 玉米; 持绿性; 氮肥形态; 光合; 产量

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

Effects of Nitrogen Forms on Yield and Photosynthetic Nitrogen in Different Stay-green Maize Cultivars

GUO Song¹, ZHOU Zi-jun¹, LIU Dong-yao², ZENG Xiang-zhong¹, YU Hua¹, CHEN Shang-hong¹, HE Ming-jiang¹,
CHEN Kun¹, SHANGGUAN Yu-xian¹, TU Shi-hua¹, QIN Yu-sheng¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066;
2. Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

Abstract: Chengdan 30(CD30) and Zhenghong505(ZH505) were used as test materials to study the yield, nitrogen efficiency and post-flowering leaf nitrogen changes under five treatments of NH₄Cl(N2), KNO₃(N3), urea(N4) and pig manure(N5) with no nitrogen(N1) and N 225 kg/ha. The results showed that, the form of N fertilizer significantly affects yield, the yield is N4>N3>N2>N5>N1. The N harvested index of ZH505 was higher than that of CD30, and the stay-green degree of CD30 was higher than that of ZH505. The leaf N concentration reached the highest value at 20 days after silking(DAS). The N form and variety significantly affect the value of Chl a and Chl b. The content of Chl a and Chl b were the highest under N4. The concentration of Chl a and Chl b in CD30 was significantly higher than that of ZH505. The average concentration of Chl a and Chl b of the two cultivars at 40DAS was reduced by 19.11%, 13.63% and 42.98%, 36.31% respectively compared with 20DAS. The form of N significantly affects the changes of Rubisco, and PEPC, and the N5 treatment is significantly higher than that of N4 treatment. So, according to the trait of stay green, the combined application of urea and organic fertilizer is a way to achieve high yield and high nutrient efficiency of maize.

Key words: Maize; Stay-green; Nitrogen form; Photosynthesis; Yield

录用日期: 2021-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(41907080)、四川省科技计划(2016JY0012, 2020YFH0171)、四川省农业科学院前沿学科研究基金(2019QYXK022)、四川省农业科学院人才基金(2020BJRC005)

作者简介: 郭松, 博士, 主要研究方向为植物营养与养分资源高效利用。E-mail: guosong1999@163.com

秦鱼生为本文通讯作者。E-mail: shengyuq@126.com

植物对土壤中氮源的利用存在多样性,既包括硝态氮、铵态氮等无机氮源,还包括酰胺态氮、游离氨基酸等有机氮源^[1]。许多因素影响农田中氮肥的使用,包括作物的种类、氮肥的形态、土壤含氮量、季节和施肥方式等。充分了解无机氮肥和有机氮肥对作物氮营养的直接贡献以及养分控制途径,是提高农田生态系统氮营养管理水平的先决条件^[2]。

玉米对不同形态氮素的吸收利用已有许多报道。硝酸盐供应有利于玉米氮素积累与生长^[3]。与单独供硝相比,单独供铵更有利于玉米获得更高的生物量也有报道^[4]。尿素可以被脲酶水解为铵态氮,进而被植物吸收,同时尿素也可以直接被植物根系吸收^[5]。另外植物能够通过根系细胞质膜上的特异载体蛋白,主动吸收氨基酸等有机氮肥。作物在有机肥处理条件下的氮吸收、利用过程与无机氮肥处理下的表现有很大差异^[6]。

参与光合作用的氮素按叶片中光合作用场所分为光合酶氮素和类囊体氮素^[7]。持绿性是玉米生长后期延缓叶片衰老或黄化而保持绿色的特性,是与产量、品质、抗性具有直接联系的重要性状。我国玉米品种间的持绿性有很大差异,导致叶片光合和氮肥利用等性状发生改变^[8]。不同形态的氮肥对持绿性差异的玉米产量以及叶片光合氮素利用的影响还不清楚。本研究通过选择品种和氮肥形态来协同实现玉米高产和氮肥高效,实现农业绿色可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于2016~2017年在四川省农业科学院川中丘陵区现代农业试验示范基地进行。该实验基地位于川省德阳市中江县,地理坐标为30°36.784'N, 105°01.322'E。玉米生长季降雨量为470 mm,平均气温为28.6℃。土壤基本理化性质为pH值7.78(1:2.5 g/v),土壤容重1.38 g/cm³,有机质11.53 g/kg,总氮1.1 g/kg,碱解氮98.4 mg/kg,有效磷6.97 mg/kg,速效钾146.1 mg/kg。

1.2 试验设计

供试品种为成单30(CD30)和正红505(ZH505),均是西南地区主栽玉米杂交种^[9]。2016年4月12日种植、8月14日收获,2017年4月10日种植、8月16日收获。试验采用随机区组设计,小区长5 m,宽4 m。种植密度为50 000株/hm²,窝距为20 cm。试验设5个氮肥处理,分别为无氮肥(N1),纯氮225 kg/hm²的NH₄Cl(N2,铵态氮肥)、KNO₃(N3,硝态氮肥)、普通尿素(N4,酰胺态氮肥)、猪粪(N5,有机氮

肥,含氮量10.0 g/kg)。每个处理3次重复。磷肥(P₂O₅)用量为90 kg/hm²,钾肥(K₂O)施用量为150 kg/hm²,所有处理磷肥、钾肥等量。有机肥和磷肥为播前一次性施入,其他氮肥和钾肥为基肥:追肥=1:1。

1.3 测定项目与方法

于2017年成熟期,每个小区取3株混样,分茎、叶和子粒3部分。烘干,测定样品干物质含量;粉样,用凯氏定氮法测定样品氮浓度。2017年玉米吐丝期开始,分别在吐丝期(0DAS),吐丝后20 d(20DAS),40 d(40DAS)和60 d(60DAS)每个小区取3株玉米穗位叶混样,采用凯氏定氮法测定样品氮浓度。于0、20和40DAS时期取穗位叶鲜样测定叶绿素a(Chla)、叶绿素b(Chlb)、核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶(Rubisco)、磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPC)的活性。酶活性的测定方法参考母小煊^[10]。

2017年分别在吐丝期和成熟期,每个小区测定5株长势一致玉米的绿叶面积。2016年和2017年成熟期时取小区的一半面积进行测产,并选取10株长势一致的玉米穗进行考种分析,测定穗粒重、百粒重、穗长和秃尖长。

氮收获指数(NHI)=子粒含氮量/成熟期植株吸氮量×100%;

每片叶的绿叶面积=叶长×叶宽×0.75;

保绿度=成熟期的绿叶面积/吐丝期绿叶面积×100%。

1.4 数据处理与分析

采用Excel 2007进行数据处理,采用IBM SPSS23软件进行显著性分析,采用SigmaPlot10.0和Adobe Illustrator CS11软件作图。

2 结果与分析

2.1 氮肥形态对玉米产量及产量性状的影响

由表1可知,施氮量和氮肥形态显著影响子粒产量、穗粒重和秃尖长。施氮处理较不施氮处理,产量从2 600 kg/hm²增加到4 300 kg/hm²以上。N₂、N₃、N₄和N₅这4种氮肥形态处理较不施氮肥增产幅度分别为69.01%, 77.82%, 88.09%和65.55%,其中在尿素处理下的产量增幅最大。从产量构成性状可以看出,尿素处理下的穗粒重高于其他处理。除百粒重外,两个品种间的子粒产量及产量构成因素没有显著差异。

2.2 氮肥形态对吸氮量、氮收获指数、株高和保绿度的影响

由图1可知,在225 kg/hm²供氮条件下,N₅处理降低了植株吸氮量,氮收获指数高于N₂、N₃和N₄

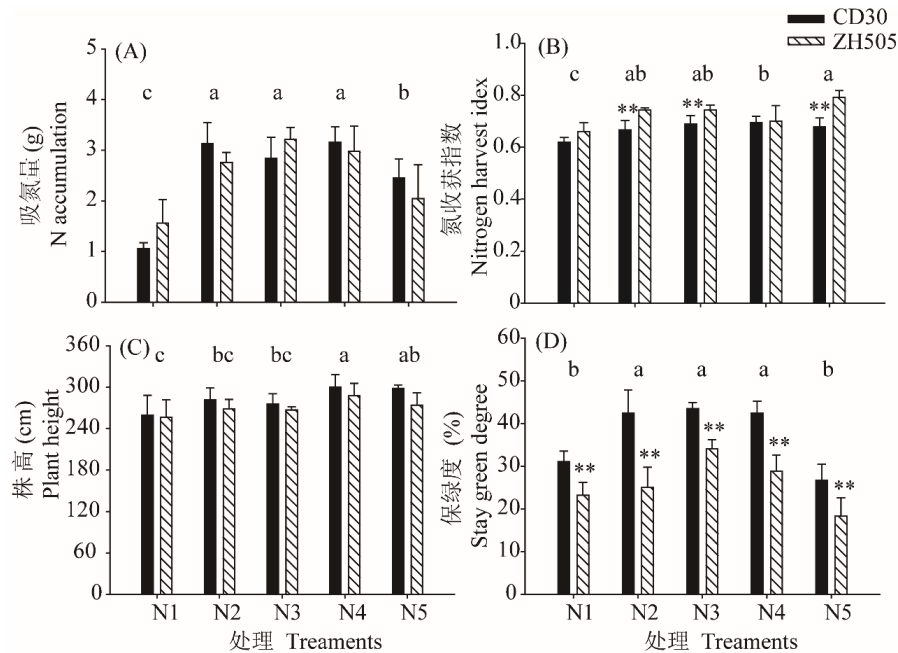
表1 产量及产量性状方差分析

Table 1 Analysis of variance in yield and ear characteristics on maize

项 目	产量(kg/hm ²)	穗粒重(g/株)	百粒重 (g)	穗长(cm)	秃尖长(cm)
Item	GY	GW	HKW	EL	BHL
氮肥(N)					
N1	2 628.79 c	44.13 c	20.59 b	10.09 b	2.55 c
N2	4 442.84 b	74.59 b	22.64 a	13.92 a	3.21 b
N3	4 674.63 ab	74.90 b	22.12 ab	13.67 a	3.57 ab
N4	4 944.55 a	81.69 a	21.51 ab	13.76 a	3.87 a
N5	4 351.97 b	73.11 b	22.19 ab	14.38 a	3.75 ab
年(Y)					
2016	4 444.34 a	74.67 a	21.78 a	13.73 a	3.41 a
2017	3 972.76 b	64.34 b	21.84 a	12.65 b	3.37 a
品种(V)					
CD30	4 317.25 a	70.56 a	23.35 a	13.12 a	3.29 a
ZH505	4 099.86 a	68.65 a	20.28 b	13.27 a	3.48 a
变异来源					
N	9 991 594.98**	2 541.61**	10.05	36.41**	4.57**
Y	3 335 155.27**	2 541.61**	0.062	18.76**	0.052
V	708 506.67	38.18	188.16**	0.44	0.67
N×Y	128 174.14	180.34*	4.89	3.78*	0.28
N×V	484 333.37	71.47	3.85	2.51	0.47
V×Y	58 906.67	81.15	3.12	7.82*	0.71
N×V×Y	378 049.71	97.00	6.87	2.36	0.63

注:不同字母表示在 $P<0.05$ 水平下具有显著性差异。*和**分别表示在0.05水平和0.01水平有显著性差异。下表、下图同。

Note: Significant differences at $P<0.05$ are indicated by different letters. *Significant at $P<0.05$, **Significant at $P<0.01$. GY, Grain yield; GW, Grain weight per panicle; HKW, hundred-kernel weight; EL, Ear length; BHL, Bald head length. The same below.



注:柱状图代表平均值±标准差(样本数=3)。

Note: Bars indicate means ± SD(n=3).

图1 不同氮肥形态处理对玉米吸氮量、氮收获指数、株高和保绿度的影响

Fig.1 Nitrogen accumulation, NHI, plant height and stay green degree of maize plants grown under different N treatments

处理,说明有机肥处理导致营养体中氮素向子粒分配增加。施氮处理的株高显著高于不施肥处理。不同氮肥形态之间,N4处理株高最高,N5处理次之,N2和N3处理无差异。增施氮肥可显著提高玉米的保绿度,由于有机肥的缓释作用,其处理下的玉米保绿度显著低于其他氮肥处理。两个品种的植株吸氮量、株高无显著差异。CD30较ZH505的氮收获指数偏低,其中在N2、N3和N5处理下差异显著。CD30的保绿度均显著高于ZH505。

2.3 氮肥形态对玉米花后叶片氮浓度的影响

由图2可知,吐丝后两个品种的叶片氮浓度在20DAS后开始降低,40DAS后下降速度加快。N5处理与N1处理下,ZH505的叶片氮浓度开始降低的时间早于CD30。N2、N3和N4处理下,两个品种叶片氮浓度变化趋势一致。在灌浆时期,两个基因型的叶片氮浓度变化趋势一致,ZH505叶片氮浓度一直低于CD30,说明ZH505叶片中氮的输出早于CD30。

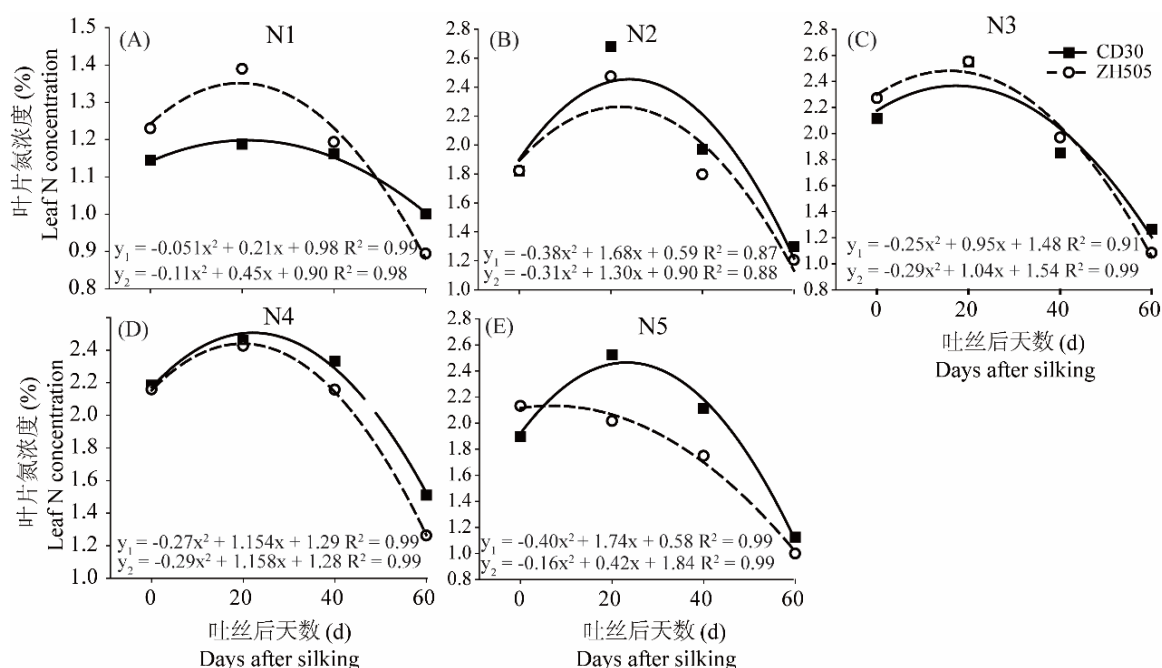


图2 不同氮肥形态处理对玉米花后叶片氮浓度的影响

Fig.2 Leaf N concentration of two maize hybrids grown under different N treatments

2.4 氮肥形态对Chla、Chlb、Rubisco和PEPC含量的影响

氮肥处理显著影响Chla、Chlb、Rubisco和PEPC的变化(表2)。N4处理下Chla、Chlb、Rubisco和PEPC酶均有较高含量,因此可保持较强的光合作用,从而提高子粒产量。氮肥×品种互作显著影响Chla、Chlb和PEPC含量变化。从整个花后生育期来看,生育进程显著影响玉米花后叶片中酶的活性。Chla、Chlb、和Rubisco的变化趋势一致,花后20d含量达到最高,之后开始下降。PEPC在花后持续升高,40DAS达到最大值。灌浆期(花后20~40d)是玉米产量形成和光合氮素再转移的关键时期。品种之间的Chla和Chlb含量有显著差异,CD30均显著高于ZH505。

在花后叶片中叶绿素的含量呈先升高后降低的趋势,在20DAS达到最高。在开花期,叶绿素a在

N4处理下含量最高,显著高于N5处理和N1处理(图3)。叶绿素b在不同氮肥形态之间无差异,均显著高于无氮肥处理。在20DAS时期,叶绿素a和叶绿素b的含量在不同氮肥处理间差异显著。N4处理显著高于N5和N2处理,与N3处理无显著差异,N1处理最低。在40DAS时期,叶绿素a在各氮肥形态之间无差异,而叶绿素b在N4处理下含量最高。

品种CD30的叶绿素含量高于ZH505。在0DAS、20DAS和40DAS时期,CD30的叶绿素a平均含量分别是ZH505的1.20、1.22和1.73倍,叶绿素b平均含量分别是ZH505的1.20、1.23和1.67倍(图3)。CD30的叶绿素a平均含量在40DAS时期较20DAS时期降低19.11%。ZH505的叶绿素a平均含量在40DAS时期较20DAS时期降低42.98%。CD30和ZH505在40DAS的叶绿素b平均含量较20DAS分别降低13.63%和36.31%。

表2 玉米叶片光合酶含量变化的方差分析
Table 2 Analysis of variance in Chlorophyll a, Chlorophyll b, Rubisco, PEPC

性 状 Trait	叶绿素 a (mg/g) Chl a	叶绿素 b (mg/g) Chl b	核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶 [nmol/(min.g)] Rubisco	磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶 [nmol/(min.g)] PEPC
氮肥 (N)				
N1	0.76 d	0.31 d	225.50 ab	443.31 b
N2	1.39 bc	0.50 bc	283.17 a	490.20 ab
N3	1.44 ab	0.51 ab	269.94 a	460.30 b
N4	1.51 a	0.55 a	275.56 a	526.09 a
N5	1.34 c	0.49 c	225.11 b	547.64 a
花后天数(D)				
0	1.29 b	0.45 b	271.00 b	469.80 b
20	1.51 a	0.55 a	349.27 a	441.53 b
40	1.06 c	0.42 c	165.30 c	571.16 a
品种(V)				
CD30	1.47 a	0.54 a	257.58 a	480.13 a
ZH505	1.11 b	0.41 b	266.13 a	506.88 a
变异来源				
N	1.66**	0.16**	9440.24*	34295.51**
D	1.52**	0.14**	255709.48**	142437.74**
V	3.03**	0.41**	1646.94	16106.84
N×D	0.062**	0.0087**	4013.42	53339.49**
N×V	0.052**	0.0088**	5590.81	34340.84**
D×V	0.23**	0.034**	2424.21	36891.94*
N×D×V	0.038**	0.0068**	4821.41	36717.28**

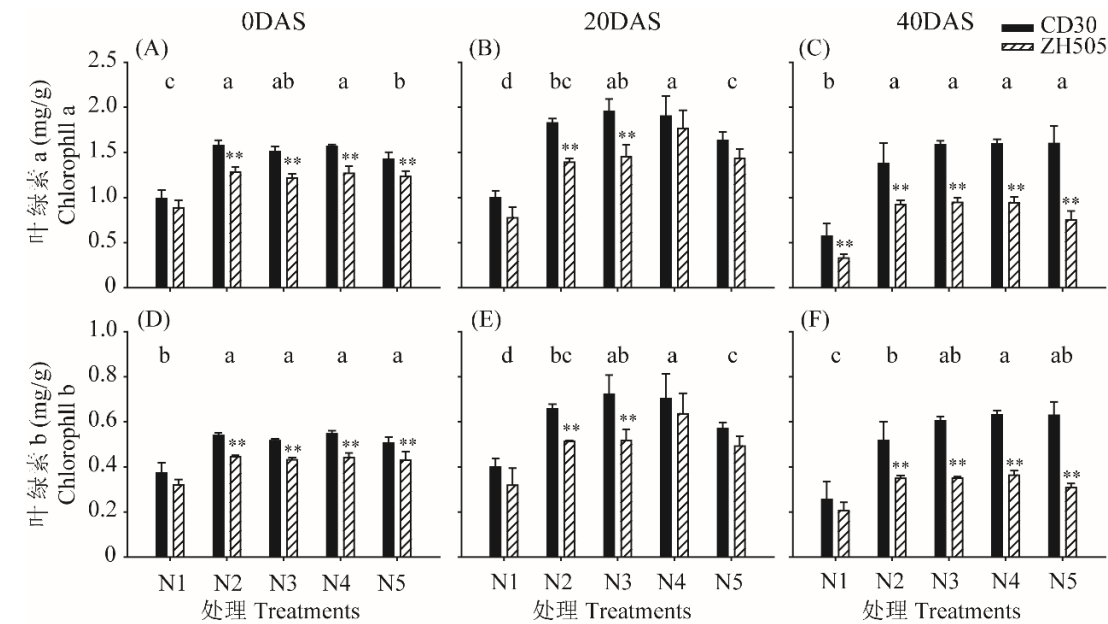


图3 氮肥形态对玉米叶片叶绿素含量的影响
Fig.3 Concentration of the Chlorophyll in the ear-leaf in two hybrids grown under different N treatments

由图4可知,在花后叶片中 Rubisco 含量呈先升高后降低的趋势。氮肥对 Rubisco 含量有显著影响,其中在 20DAS,N4 和 N3 处理下的含量最高,N5 处理较低;在 40DAS,N3 处理下的含量最高,N5 和 N4 处理较低;在吐丝期时,CD30 在 N4 处理下的 Rubisco 含量显著高于 ZH505,其他处理无显著差异。叶片

中PEPC含量在花后呈一直升高趋势,氮肥形态对PEPC含量影响显著,在20DAS, N3处理下的含量最高, N2处理较低;在40DAS, N5处理下的含量最高,

硝态氮肥处理最低。品种CD30的PEPC含量与ZH505无差异。

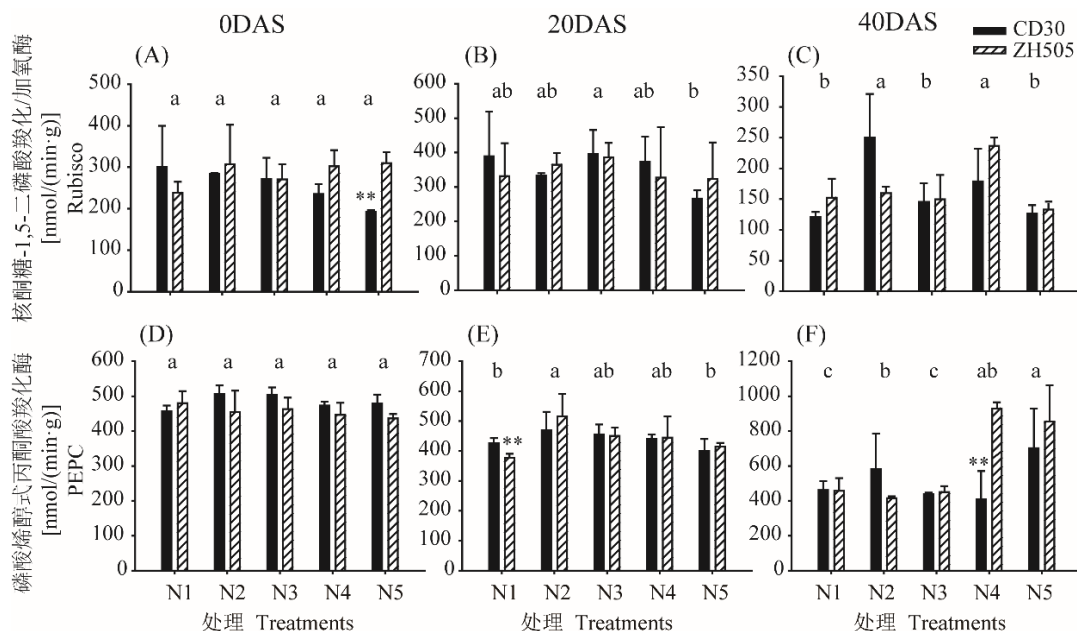


图4 氮肥形态对玉米叶片 Rubisco 和 PEPC 浓度的影响

Fig.4 Concentration of the Rubisco and PEPC in the ear-leaf in two hybrids grown under different N treatments

3 结论与讨论

绿熟是近代玉米育种的重要标志^[12]。增加叶片持绿性可以延缓叶片衰老,同时更重要的是维持玉米叶片花后的光合作用,进而提高产量^[13]。绿熟品种可分为过度绿熟品种和中度绿熟品种^[14]。本研究中CD30的保绿度在所有处理下均显著高于ZH505, CD30的叶绿素含量在各个生育期均显著高于品种ZH505。两个品种在产量和吸氮量等性状无显著差异,而氮素收获指数差异显著,说明不同品种在体内氮素分配利用上有差异。绿熟性差异品种在花后叶片氮浓度变化趋势不同,持绿性低的品种ZH505花后叶片氮浓度开始降低的时间早于品种CD30。XY335作为适宜绿熟品种,其叶片氮转移效率高于过度绿熟品种,从而提高子粒氮浓度和NHI。

氮是影响玉米生长和持绿性的关键因素^[15]。硝态氮(NO_3^-)和铵态氮(NH_4^+)是土壤中可以植物吸收的主要氮素形态,有机态氮一般先被微生物利用,在微生物的矿化作用下形成无机态氮^[16]。本研究表明,缺氮会导致玉米产量、吸氮量、NHI和保绿度的降低,只供应有机氮肥表现出较等量无机氮肥低的产量、吸氮量和保绿度,原因是由于有机氮肥的缓释效应,不能完全满足玉米生长季的氮肥需要,出现缺

氮的表现。有研究表明,尿素处理下的早熟玉米产量和吸氮量高于其他氮肥形态(包括硫酸铵、控释氮肥和硝酸铵钙等)^[17]。在较肥沃的黑土上,不同形态氮肥对玉米产量、土壤养分的影响并不明显^[18]。本研究表明,尿素处理下产量显著高于铵态氮肥和有机氮肥处理,与硝态氮肥处理无显著差异。

叶绿素是类囊体氮素的主要组成部分。研究发现,叶绿体中的光合酶氮素含量占叶片氮含量的45.3%,捕光色素复合体氮素占叶片氮含量的27.4%,是叶片氮转移的主要来源^[19]。本研究发现,灌浆期是叶片光合氮素利用的关键时期,叶绿素和Rubisco的含量在20DAS达到最大值,之后随着叶片氮浓度的下降开始显著降低。CD30叶绿素a在40DAS的平均含量较20DAS降低19.11%,ZH505降低13.63%;CD30叶绿素b在40DAS的平均含量较20DAS降低42.98%,ZH505降低36.31%。Rubisco是光合酶氮素的主要组成部分,受氮肥形态和生育时期的显著影响,在两个品种之间无显著差异。研究表明,过度绿熟和适宜绿熟对叶片光合作用无显著变化,但过度绿熟会导致叶片中氮的冗余^[20]。

作物对氮肥形态的利用与作物种类、环境、pH值以及氮浓度有关^[21]。施肥方式也会影响玉米开花期的叶面积指数及花后叶片的衰老^[22]。本研究表

明,尿素处理下叶绿素a、叶绿素b、Rubisco和PEPC酶均有较高含量,因此光合作用较强,从而提高子粒产量。因为尿素施入土壤中,被脲酶水解为 NH_3 ,进而通过硝化作用形成 NO_3^- ,所以土壤中会同时存在酰胺态氮、铵态氮和硝态氮。铵硝混合供氮可促进玉米光合速率,促进叶面扩展^[21]。由于有机肥在土壤中有缓慢释放的特性,作物在有机肥处理条件下的氮利用效率较高。

综上所述,氮肥形态显著影响玉米的产量和氮利用效率,品种间持绿性的差异显著影响叶片光合氮素Chl a、Chl b的利用。相对于单纯地使用无机氮肥,有机肥和无机肥联合施用可以提高作物产量和氮吸收效率。因此根据玉米品种的持绿特性,通过尿素和有机肥的配合施用,可达到产量和氮素利用双高效的目标。

参考文献:

- [1] Marschner H. Marschner's mineral nutrition of higher plants[M]. San Diego, USA: Academic Press, 2012.
- [2] 曹小闯,吴良欢,马庆旭,等.高等植物对氨基酸态氮的吸收与利用研究进展[J].应用生态学报,2015,26(3):919-929.
Cao X C, Wu L H, Ma Q X, et al. Advances in studies of absorption and utilization of amino acids by plants: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 919-929. (in Chinese)
- [3] Prinsi B, Espen L. Time-course of metabolic and proteomic responses to different nitrate/ammonium availabilities in roots and leaves of maize[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(8): 23.
- [4] Wang P, Wang Z K, Sun X C, et al. Interaction effect of nitrogen form and planting density on plant growth and nutrient uptake in maize seedlings[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(5): 1120-1129.
- [5] Liu G W, Sun A L, Li D Q, et al. Molecular identification and functional analysis of a maize(*Zea mays*) DUR3 homolog that transports urea with high affinity[J]. Planta, 2015, 241: 861-874.
- [6] Guo S, Sun W Y, Gu R L, et al. Expression of genes related to nitrogen metabolism in maize grown under organic and inorganic nitrogen supplies[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2015, 61: 275-280.
- [7] Mu X H, Chen Q W, Chen F J, et al. Dynamic remobilization of leaf nitrogen components in relation to photosynthetic rate during grain filling in maize[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 129: 27-34.
- [8] Chen F J, Liu J C, Liu Z G, et al. Breeding for high-yield and nitrogen use efficiency in maize: lessons from comparison between Chinese and US cultivars[J]. Advances in Agronomy, 2021, 166: 251-275.
- [9] 李 强,罗延宏,谭 杰,等.玉米杂交种苗期耐低氮指标的筛选与综合评价[J].中国生态农业学报,2014,22(10):1190-1199.
Li Q, Luo Y H, Tan J, et al. Indexes screening and comprehensive evaluation of low nitrogen tolerance of hybrid maize cultivars at seedling stage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(10): 1190-1199. (in Chinese)
- [10] 母小焕.叶片水平上玉米氮素高效利用的生理机制[D].北京:中国农业大学,2017.
- [11] 郭 松,孙文彦,顾日良,等.两个玉米品种灌浆期叶片氮转移效率差异的分子机制[J].植物营养与肥料学报,2018,24(5): 1149-1157.
Guo S, Sun W Y, Gu R L, et al. Difference in leaf nitrogen remobilization efficiency and related gene expression during grain filling phase of two maize hybrids[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(5): 1149-1157. (in Chinese)
- [12] Duvick D N. The contribution of breeding to yield advances in maize(*Zea mays* L.)[J]. Advances in Agronomy, 2005, 86: 83-145.
- [13] Lee E A, Tollenaar M. Physiological basis of successful breeding strategies for maize grain yield[J]. Crop Science, 2007, 47(Supplement 3): S-202.
- [14] 郭 松.持绿性对中国玉米品种氮转移效率的影响及其作用机制[D].北京:中国农业大学,2015.
- [15] Ciampitti I A, Vyn T J. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review[J]. Field Crops Research, 2012, 133: 48-67.
- [16] 陈晓亚,薛红卫.植物生理与分子生物学[M].北京:高等教育出版社,2012.
- [17] 薛艳芳,韩小伟,张 慧,等.不同氮效率玉米品种灌浆期氮素转运特性和产量对氮素形态的响应[J].玉米科学,2020,28(3): 163-172.
Xue Y F, Han X W, Zhang H, et al. Characteristics of nitrogen translocation during the grain-filling period and grain yield of different maize cultivars with varied nitrogen efficiencies in response to different nitrogen forms[J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(3): 163-172. (in Chinese)
- [18] 尹彩霞,左 竹,李桂花.不同形态氮肥对玉米产量和土壤浸提性有机质的影响[J].中国土壤与肥料,2011(3):27-30,86.
Yin C X, Zuo Z, Li G H. Effect of nitrogen forms on maize yield and soil extractable organic matter[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2011(3): 27-30, 86. (in Chinese)
- [19] Martinez D E, Costa M L, Guamet J J. Senescence-associated degradation of chloroplast proteins inside and outside the organelle[J]. Plant Biology, 2008, 10 Suppl 1: 15-22.
- [20] Thomas H, Ougham H. The stay-green trait[J]. Journal of Experimental Botany, 2014, 65(14): 3889-3900.
- [21] 王 朋.铵硝混合供氮促进玉米生长的生理机制[D].北京:中国农业大学,2019.
- [22] 展文洁,刘剑钊,梁 尧,等.不同农艺运筹模式对玉米产量、养分吸收及群体光合特性的影响[J].玉米科学,2020,28(5):155-161.
Zhan W J, Liu J Z, Liang Y, et al. Yield and photosynthetic characteristics of spring maize under different agronomic management conditions[J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(5): 155-161. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)