

陇中旱农区有机肥替代化肥对玉米 氮代谢酶活性的影响

赵潇潇, 李玲玲, 谢军红, 谢丽华, 王进斌, 惠领领, Setor kwami FUDJOE

(甘肃农业大学农学院/甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 兰州 730070)

摘 要: 为了探究陇中旱农区有机肥替代化肥的适宜比例, 减少玉米生产中化肥的投入, 在甘肃定西设等氮量(200 kg/hm²)的5个商品有机肥替代化肥的比例(0、50.0%、37.5%、25.0%、12.5%)和不施氮处理, 研究不同替代比例对玉米叶片叶绿素含量、氮代谢相关酶活性、玉米产量及氮素利用效率的影响。结果表明, 施氮处理显著提高硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合成酶(GOGAT)和谷丙转氨酶(GPT)活性。与单施化肥相比, 有机肥替代化肥12.5%和37.5%处理显著提高GOGAT和GS活性, 分别较单施化肥增加35.6%和52.5%、20.7%和39.5%。与不施氮相比, 有机肥替代化肥12.5%和37.5%显著提高叶绿素含量、叶面积指数, 分别提高97.5%和109.8%、102.8%和125.6%, 与单施化肥无显著差异。氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力, 有机肥替代化肥12.5%和37.5%显著低于单施化肥, 玉米产量无显著差异。

关键词: 玉米; 有机肥; 氮代谢酶; 产量

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

Effect of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer Nitrogen on Nitrogen Metabolism Enzyme Activity of Maize in Arid Region of Central Gansu

ZHAO Xiao-xiao, LI Ling-ling, XIE Jun-hong, XIE Li-hua, WANG Jin-bin, HUI Ling-ling, Setor kwami FUDJOE

(Gansu Provincial Key Lab. of Arid Land Crop Sciences / Agronomy College,

Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To determine the optimal amount of organic fertilizer to be used instead of chemical fertilizer in the arid agricultural areas of central Gansu, and to reduce nitrogen use of chemical fertilizer in maize cultivation. Five commercial organic fertilizers with an equivalent nitrogen content of 200 kg/ha(0, 50.0%, 37.5%, 25.0%, 12.5%) and one treatment without nitrogen application were studied in Dingxi, Gansu province. The effects of different substitution ratios on chlorophyll, enzymes involved in nitrogen metabolism, maize yield, and nitrogen utilization efficiency in maize leaves were studied. The results showed that nitrogen treatment significantly increased the activities of NR, GOGAT, GS, and GPT. The activities of GOGAT and GS increased by 35.6% and 52.5%, 20.7% and 39.5%, respectively, compared to a single application of chemical fertilizer. There was no significant difference in chlorophyll content and leaf area index between 12.5% and 37.5% organic fertilizer instead of chemical fertilizer–nitrogen and single chemical fertilizer which were 97.5% and 109.8%, 102.8% and 125.6% higher than those without nitrogen application respectively. Compared with no nitrogen application. The significant factor for agronomic efficiency of nitrogen and nitrogen partial productivity of organic fertilizer replacing nitrogen of chemical fertilizer by 12.5% and 37.5%, respectively, lower than that of a single chemical fertilizer, respectively, but maize yield was not significantly different.

Key words: Maize; Organic fertilizer; Nitrogen metabolism enzyme; Yield

录用日期: 2022-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(31761143004)、国家重点研发计划(2021YFD190070403)、甘肃省教育厅双一流重大科研项目(GSSYLXM-02)

作者简介: 赵潇潇(1996-), 女, 甘肃武威人, 在读硕士, 主要研究方向为旱地与绿洲农作制度。Tel: 18298303016

E-mail: 1511203382@qq.com

李玲玲为本文通信作者。E-mail: lill@gsau.edu.cn

玉米是我国三大粮食作物之一,同时也是重要的饲料作物,玉米产量的提高对于保障粮食安全和缓解饲料紧缺具有不可替代的作用^[1]。陇中旱农区是我国典型的雨养农业区之一,近年来,全膜双垄沟播玉米种植技术在该区被广泛推广,在这一种植技术下,玉米产量显著提高。多年来,甘肃省全膜双垄沟播玉米种植总面积维持在60万hm²以上^[2]。该技术对提高土地生产能力和玉米产量卓有成效,而高产意味着对土壤养分的高需求,因此必须重视土壤肥力水平,以保证该区玉米持续高产^[3]。随着陇中旱农区玉米种植面积的不断扩大,出现了化肥施用过量、轻视有机肥、施肥不合理等问题^[4]。

氮素是作物生长发育的主要限制因素,氮肥的不合理施用会对玉米产量和品质造成负面影响,合理施氮在影响玉米氮素吸收及产量形成的诸多因素中起着25%~30%的作用^[5]。尿素是目前农业生产中的主要氮肥,肥效快但氮肥利用率低,损失过多^[6]。过量施用氮肥会加剧氮素在土壤中的残留,加速土壤酸化,破坏土壤结构,加重土壤污染^[7]。施用有机肥有利于土壤养分的供需平衡,减少肥料的浪费,而有机肥肥效慢,养分含量低^[8-10]。因此,有机肥替代部分化肥既可满足玉米整个生育期内的养分需求,又能降低单施化肥对环境造成的危害,进而有利于作物产量的提高和农业的可持续发展。

氮代谢关键酶活性是衡量作物氮素需求特征的重要指标,硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合成酶(GOGAT)和谷丙转氨酶(GPT)是作物氮素代谢的关键酶,这些酶的活性高低决定着作物

的氮素同化转运能力^[11]。同时,对氮代谢关键酶活性的探讨是揭示不同有机肥替代比例对玉米氮素利用效率和产量形成影响机制的重要切入点。在陇中旱农区关于有机肥替代化肥的大量研究多集中在玉米光合特性和碳代谢特征方面,而对于玉米叶片氮代谢关键酶活性的研究报道较少。因此,本试验基于2016年在甘肃农业大学旱作农业综合试验站布设的有机肥替代化肥的田间定位试验,研究有机肥不同替代比例对玉米叶片叶绿素含量、氮代谢关键酶活性、氮素利用效率及产量的影响,探讨陇中旱农区全膜双垄沟播技术下促进氮素高效利用的有机肥替代化肥比例,为该区玉米合理施氮提供理论和技术依据。

1 试验与设计

1.1 试验区概况

试验于2021年在甘肃农业大学旱作农业综合试验站(104°36' E, 35°35' N)进行,该区属于中温带半干旱雨养农业区,平均海拔2 000 m,日照时数2 476.6 h,年均气温6.4℃,≥0℃积温2 933.5℃·d,≥10℃积温2239.1℃·d,无霜期140 d。多年平均降水量为390.9 mm,年蒸发量1 531 mm,干燥度2.53。试验地土壤为质地均匀的黄绵土,土壤松软,具有良好的储水性能。土壤基础理化性质,pH值8.36,有机质11.92 g/kg,土壤全氮、全磷含量分别为0.78、1.81 g/kg。2021年降水量为286 mm(图1),该年属于特别干旱年,玉米生长期降雨量为213 mm。

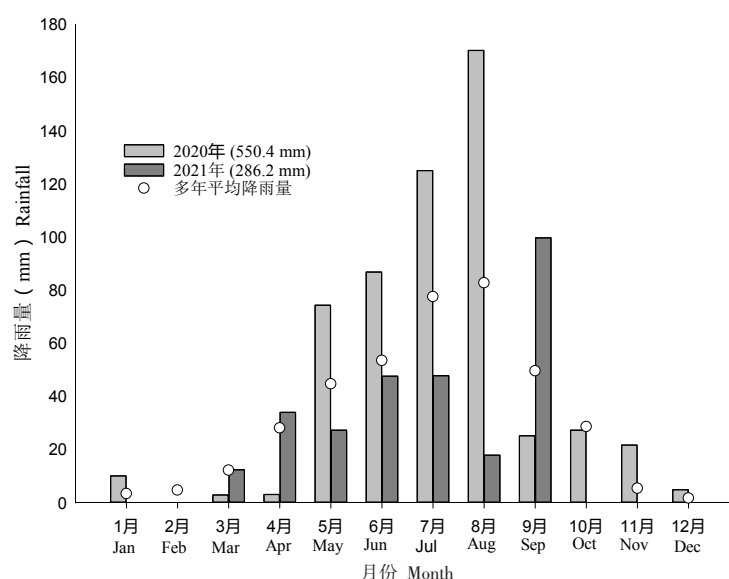


图1 2020~2021年试验区降雨量

Fig.1 Monthly rainfall in 2020-2021

1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,设5个有机肥不同替代比例,以不施氮为对照(表1)。共6个处理,每个处理3次重复,共18个小区,小区面积38 m² (8.5 m×4.5 m)。玉米品种为先玉335,种植密度为5.25×10⁴株/hm²。试验所用有机肥由本项目组与甘肃大行农业科技有限公司共同研制,以牛粪为主要

原料生产的玉米专用商品有机肥,N、P、K含量分别大于3.3%、1.0%、0.7%,有机质含量大于60%。施肥量为等氮和等磷,分别为纯N 200 kg/hm²和纯P₂O₅ 150 kg/hm²。2021年特旱,9月下旬玉米叶片全部干枯,玉米未能正常成熟,4月27日播种,9月20日收获,其他田间管理同大田。

表1 处理描述及各处理氮肥施用

Table 1 Treatment description and nitrogen fertilizer application scheme of each treatment						kg/hm ²
代 码 Code	处理名称 Treatment	基 肥 Basic fertilizer		尿素追肥 Urea additional fertilizer		
		有机肥 Organic fertilizer	尿 素 Urea	大喇叭口期 Big bell mouth period	开花期 Florescence	
T1	100%化肥	0	100	60	40	
T2	50%有机替代	100	0	60	40	
T3	37.5%有机替代	75	25	60	40	
T4	25%有机替代	50	50	60	40	
T5	12.5%有机替代	25	75	60	40	
T6	不施肥	0	0	0	0	

1.3 测定项目与方法

采用SPAD-502叶绿素仪于玉米大喇叭口期、开花期、灌浆期测定玉米穗位叶的SPAD值,每个小区挑选具有代表性的3株,每株挑选3片穗位叶,每片按不同部位测定3次,取平均值。采用长宽系数法于玉米拔节期、大喇叭口期、开花期和灌浆期测定叶面积指数,各小区随机挑选3株,测量每株叶片的长度和最大宽度。计算公式:

$$LAI = 0.75\rho_{\text{种}} \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (L_{ij} \times B_{ij})}{m}$$

式中:*n*是*j*株的总叶片数;*m*是测定株数; $\rho_{\text{种}}$ 是种植密度;*L_{ij}*是叶长;*B_{ij}*是最大叶宽。

采用烘干法测定,在拔节期、大喇叭口期、开花期和灌浆期随机挑选3株,于105℃杀青30 min后在80℃下烘干至恒重,测定不同生育时期的干物质量积累量,并计算不同部位的分配率。在大喇叭口期、开花期和灌浆期,随机选取4株长势基本相同的植株穗位叶(吐丝期之前的取最新展开叶)去除叶尖、叶基和叶脉,分别测定硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合成酶(GOGAT)和谷丙转氨酶(GPT)的活性。参考李合生^[12]方法测定NR活性,参照Zhang等^[13]方法测定GS活性,参照Lin等^[14]方法测定GOGAT活性,参考吴良欢等^[15]方法测定谷丙转氨酶(GPT)活性。

玉米子粒产量每个小区单独收获,晾晒子粒,待可以容易脱离穗轴时,进行脱粒,折算公顷产量(按安全储藏水分含水率14%计算)。

氮肥农学利用效率(kg/kg)=(施氮区子粒产量-不施氮区子粒产量)/施氮量;

氮肥偏生产力(kg/kg)=施氮区子粒产量/施氮量。

1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2016、Sigmaplot 14.0和SPSS (PASWStatistics 25)分别进行数据处理、作图和统计分析。

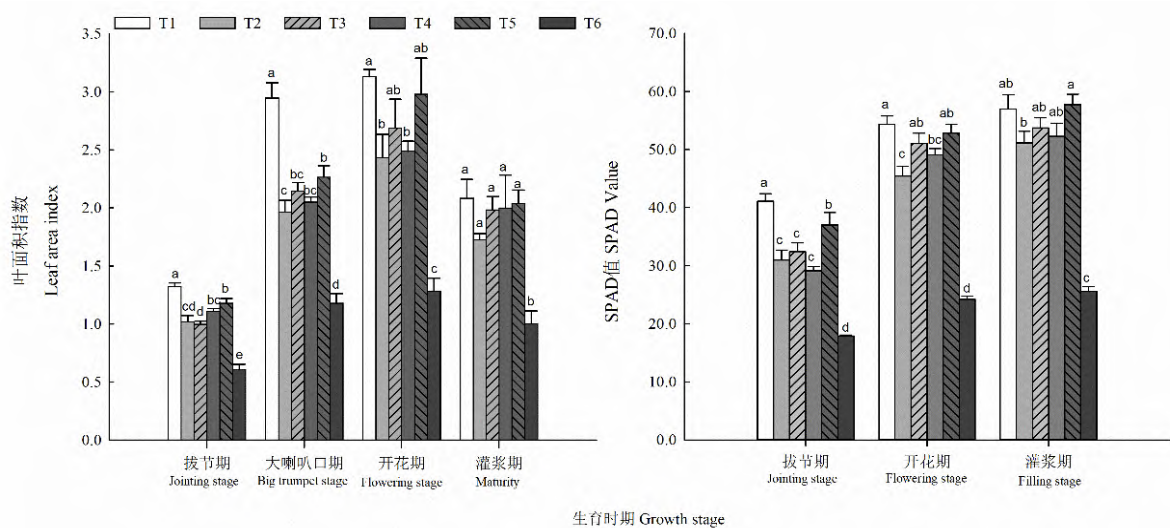
2 结果与分析

2.1 玉米叶面积指数和SPAD值

由图2可见,叶面积指数随着玉米生育期先增长后降低,开花期达最高。在玉米生育时期,施氮处理均显著高于不施氮处理;在开花期前,叶面积指数单施化肥T1处理显著高于其他施氮处理;开花期各处理间玉米叶面积指数的差异逐渐减小,单施化肥T1处理与有机替代T3(37.5%)、T5(12.5%)处理无显著差异;灌浆期施氮处理之间无显著差异。

玉米生育期叶片的SPAD值,随着生育时期的推进各施氮处理玉米差异逐渐减小,且在生育后期各施氮处理无显著差异,在玉米生育时期,施肥处理均显著高于不施氮处理。在玉米生育时期,随着增

加有机肥替代化肥比例,玉米 SPAD 值没有同步上升而是基本呈下降趋势。有机肥相对于化肥肥效缓慢,能提高玉米生育中后期叶面积指数和叶片的 SPAD 值。



注:不同小写字母表示不同处理间差异达0.01显著水平。下图、下表同。
Note: Values within a column followed by different letters are significantly different at the 0.01 probability level among different treatments.
The same below.

图2 不同施肥处理下玉米的叶面积指数和SPAD值

Fig.2 Leaf area index and chlorophyll contents of maize under different fertilization treatments

2.2 地上部干物质积累量

玉米有机肥替代化肥各生育时期干物质累积及灌浆期干物质分配情况见表2。玉米干物质积累量在整个生育期呈先快速增长后缓慢增长的趋势。干物质积累量在玉米各生育时期平均为1 278.3、5 440.6、11 525.2、14 098.5 kg/hm²,大喇叭口期、开花期和灌浆期增长速率分别为321.1%、110.7%、23.0%。灌浆期玉米干物质分配比例从低到高的顺

序为苞叶、穗轴、叶、茎、子粒,分配率为46.3%、19.1%、16.7%、9.6%、8.4%。子粒干物质分配率基本随着有机肥替代化肥比例的增大而减小,顺序从大到小依次为T1>T5>T3>T4>T2>T6。在拔节期,各处理之间的干物质积累量无差异;在大喇叭口期到灌浆期干物质积累量差异逐渐增大,灌浆期达到最大,有机替代T3、T5处理与单施化肥T1处理无显著差异,显著高于其他施氮处理。

表2 不同施肥处理玉米各生育时期干物质累积及灌浆期干物质分配

Table 2 Dry matter accumulation and distribution at filling of maize under different fertilization treatment

处 理 Treatment	干物质积累量(kg/hm ²) Dry matter accumulation				灌浆期干物质分配(%) Dry matter distribution at filling				
	拔节期 Jointing	大喇叭口期 Big trumpet	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	叶 Leaf	茎 Stem	苞叶 Bract	穗轴 Cob	子粒 Grain
T1	1 447.6±99.70 a	6 776.4±430.75 a	14 067.5±435.45 a	16 773.9±409.09 a	16.5	16.8	8.8	9.3	48.6
T2	1 440.1±131.92 a	5 099.6±460.21 b	11 384.8±554.46 b	13 676.2±313.25 c	18.0	20.2	7.7	9.4	44.7
T3	1 341.9±153.32 a	5 725.5±345.73 ab	12 117.1±366.19 b	16 513.5±1 837.18 ab	15.6	19.2	9.4	9.8	46.0
T4	1 301.5±106.12 a	6 386.4±348.08 a	12 447.1±696.52 b	14 158.7±354.53 bc	17.6	19.0	8.5	9.3	45.6
T5	1 493.0±125.97 a	6 297.9±355.52 a	14 498.9±480.13 a	17 566.7±603.62 a	15.9	17.6	9.1	10.1	47.3
T6	645.6±69.58 b	2 358.0±299.52 c	4 636.0±235.08 c	5 901.9±588.32 d	16.8	21.7	6.6	9.5	45.5

2.3 氮代谢酶

由图3可知,NR活性在整个玉米生育期内先增后减,在开花期达到最大;开花前有机肥替代化肥处

理增加幅度大于单施化肥处理,较单施化肥增加7.0%~13.9%;进入灌浆后期,叶片迅速衰老,单施化肥T1处理与有机替代T3、T5处理无显著差异,显

著高于其他施氮处理。

与单施化肥相比,有机肥替代化肥 12.5%和 37.5%显著提高 GOGAT 和 GS 活性,分别较单施化肥增加 35.6%和 52.5%、20.7%和 39.5%。其中,GOGAT 活性在大喇叭口期单施化肥 T1 处理显著高于其他处理,在开花前期呈上升趋势,单施化肥 T1 处理的增长幅度低于有机肥替代处理,较单施化肥处理增加 43.7%~72.4%;开花期各施氮处理差异不显著;在开花后期呈下降趋势,T1 处理的降低速度快于有机肥替代处理,T1~T5 处理下降幅度分别为 98.7%、

42.2%、58.9%、80.8%、43.2%;在灌浆期单施化肥 T1 处理 GOGAT 活性显著低于有机替代 T3、T5 处理。GS 活性随生育期呈先增加后减小趋势,玉米 GS 活性在各处理之间的差异性与 GOGAT 一致。

GPT 活性在大喇叭口期差异最大,灌浆期差异最小。在整个生育时期内,随着有机肥替代比例的上升,GPT 活性基本在下降。在大喇叭口期,单施化肥 T1 处理 GPT 活性高于其他处理。在开花期和灌浆期,除不施肥处理,其他各处理之间 GPT 活性无显著差异。

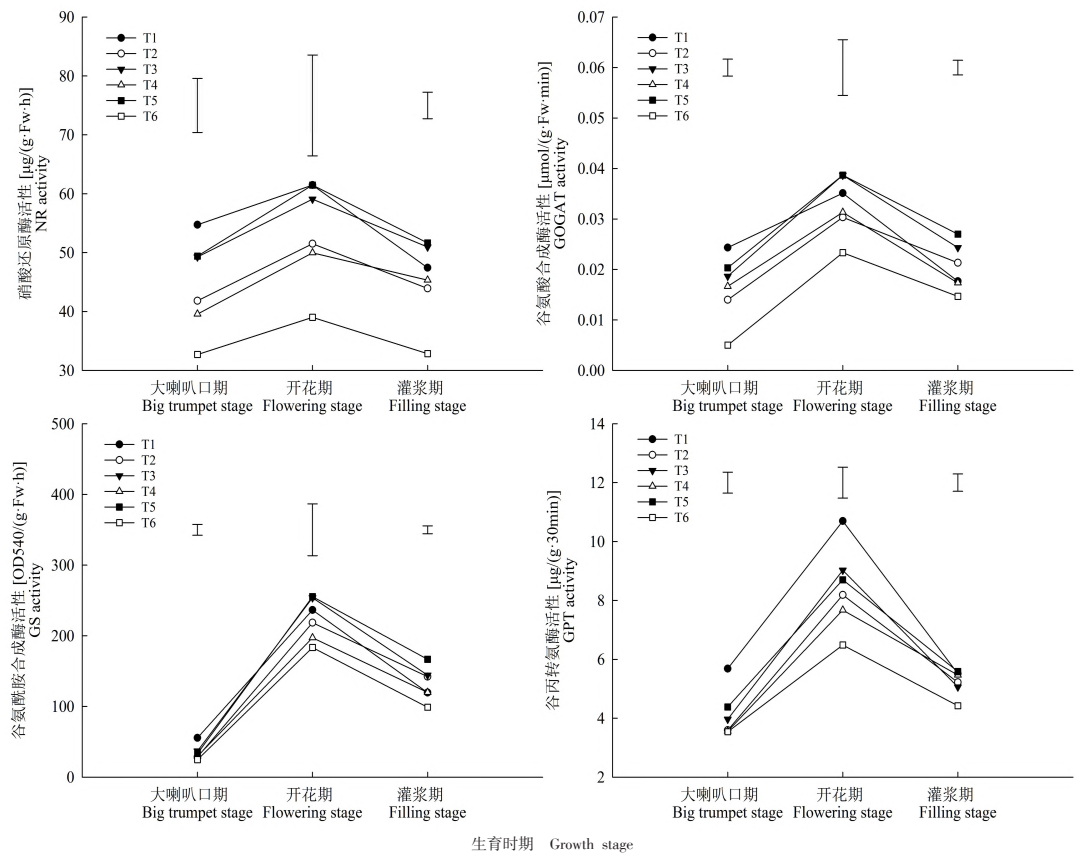


图3 不同处理对玉米氮代谢酶的影响

Fig.3 Effects of different treatments on maize leaf nitrogen metabolism enzyme activity

2.4 玉米产量和氮素利用效率

表3 不同施肥处理玉米产量、氮素偏生产力和农学利用效率

Table 3 Yield, nitrogen partial factor productivity and agronomic use efficiency of maize under different fertilization treatments

处 理	子粒产量(kg/hm ²)	生物产量(kg/hm ²)	偏生产率(kg/kg)	农学利用率(kg/kg)
Treatment	Grain yield	Biological yield	Partial factor productivity	Agronomic N use efficiency
T1	8 406.2±590.02 a	23 036.2±1 019.97 a	42.00±0.68 a	29.7±0.68 a
T2	7 952.0±1 387.64 b	20 735.0±1 868.94 a	39.76±0.65 b	27.5±0.60 b
T3	8 118.1±1 173.63 ab	22 069.2±125.88 a	40.59±0.23 b	28.3±0.21 b
T4	5 684.5±1 198.51 c	19 669.8±1 209.45 a	28.42±0.25 c	16.1±0.21 c
T5	8 106.3±838.50 ab	22 436.8±1 688.11 a	40.53±0.46 b	28.2±0.43 b
T6	2 457.8±143.56 d	6 795.3±616.20 b	—	—

由表3可知,施氮处理与不施氮处理相比显著增加了玉米子粒产量和生物产量,单施化肥T1处理与12.5%和37.5%有机肥替代处理子粒产量无显著差异,各施氮处理的生物产量无显著差异,说明12.5%和37.5%有机肥替代不会降低玉米子粒产量,有机肥替代化肥对生物产量无影响。氮肥利用效率在施氮处理之间相比,单施化肥T1处理最高,有机

替代T4处理最低,T2、T3、T5处理无显著差异。

由表4相关性分析可知,玉米叶面积指数、玉米氮代谢关键酶活性、叶绿素相对含量和产量呈正相关或显著正相关,说明有机肥保持玉米产量不降低的生理基础是提高玉米氮代谢关键酶活性,提高植株对氮素的同化能力,促进氮代谢产物向子粒转运,从而稳产。

表4 玉米叶片氮代谢酶活性与产量的相关性
Table 4 Correlation between nitrogen metabolism enzyme activity and yield of maize

项 目 Item	谷丙转氨酶 GPT	谷氨酰胺合成酶 GS	谷氨酸合成酶 GOGAT	SPAD值 SPAD value	叶面积指数 LAI	子粒产量 Grain yield	生物产量 Biomass
硝酸还原酶	0.470*	0.723**	0.721**	0.850**	0.820**	0.847**	0.897**
谷丙转氨酶		0.412	0.286	0.560*	0.532*	0.614**	0.652**
谷氨酰胺合成酶			0.931**	0.623**	0.466	0.723**	0.612**
谷氨酸合成酶				0.552*	0.448	0.666**	0.592**
SPAD值					0.898**	0.844**	0.891**
叶面积指数						0.734**	0.852**
子粒产量							0.917**

注: *、**分别表示0.05、0.01水平上差异显著。
Note: * and ** represented significantly different at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3 结论与讨论

3.1 有机肥代替化肥对玉米产量和氮肥利用的影响

谢军^[16]等研究发现,有机肥替代化肥显著提高玉米子粒产量和生物量。与不施肥、单施化肥相比,有机肥替代化肥玉米子粒平均增产率分别为13.7%、13.5%,生物量增产11.3%、7.0%。本研究发现,施氮水平为200 kg/hm²时,施氮处理的氮肥利用效率显著高于不施氮处理,有机肥替代化肥处理显著低于单施化肥处理。在玉米子粒产量和干物质积累量方面,有机肥替代化肥处理与不施氮处理比较具有增产作用,有机肥替代化肥T3、T5处理和单施化肥T1处理差异不显著,这主要是有机肥通过生育前期控氮、将部分氮向生育后期移动提高干物质的转化效率^[18],从而稳产。有机肥中不仅仅含有N还含有P、K以及其他元素,作物产量、叶绿素、干物质积累和叶面积指数等指标是各种元素共同作用的结果。2021年的降雨量相比于2020年低48%,子粒产量也受到干旱的影响,从作物产量、叶绿素、干物质积累量和叶面积指数来看,T3、T5处理子粒产量较高。综上所述,T1、T3、T5处理在玉米整个生育时期营养与生殖的关系均衡,子粒产量无显著差异。因此,在特别干旱的年份12.5%和37.5%替代比例最好。

3.2 有机肥代替化肥对氮代谢酶的影响

玉米叶片中的硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合成酶(GOGAT)和谷丙转氨酶(GPT)是衡量氮代谢强弱的重要指标,GS和GOGAT偶联形成的循环反应是作物氮代谢的主要途径和中心,且GS、GOGA与NR活性关系密切,在氮代谢中起协调作用^[19]。本研究发现,T3、T5处理相对于其他替代处理增强了玉米NR活性,与单施化肥差异不显著。GS和GOGAT的变化趋势一致,在玉米开花前期,单施化肥GS、GOGAT显著高于其他处理,开花期处理间差异达到最小,开花期后T3、T5处理GS、GOGAT活性显著超过单施化肥处理,说明T3、T5处理有利于玉米叶片氮代谢关键酶活性的提高。GPT活性随着玉米生育时期推进差异逐渐减小,开花期前单施化肥T1处理GPT活性显著高于其他处理;在开花期后各施氮处理之间GPT活性无明显差异。这可能是化肥氮在土壤中转化较快,肥效迅速,而有机肥能够弥补这一不足,使有机肥释放与玉米生长关键期的氮素需求同步,减缓肥料通过挥发和淋溶的损失,有利于提高玉米生育后期氮代谢关键酶活性,有利于提高玉米氮肥转化与积累^[20]。碳氮代谢是一个复杂的过程,在T1、T3和T5处理下,氮代谢酶的提高可能增加了叶片可溶性蛋白的含量^[21],提高叶绿素含量,促进玉米生育后期的碳代谢和光合

作用,阻止叶片的早衰,进而提高玉米子粒产量。

在相同施氮量 200 kg/hm²下,陇中旱农区采用全膜双垄沟播技术种植,在特旱年份以 12.5%或 37.5%的有机肥替代化肥,可提高玉米氮代谢关键酶活性,提高植株对氮素的同化能力,进而促进氮代谢产物向玉米子粒转运,从而保证稳产。

参考文献:

- [1] 武文明,陈洪俭,王世济,等. 氮肥运筹对苗期受渍夏玉米干物质和氮素积累与转运的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(8): 1246–1256.
- [2] WU W M, CHEN H J, WANG S J, et al. Effects of nitrogen fertilization application regime on dry matter, nitrogen accumulation and transport in summer maize under waterlogging at the seedling stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(8): 1246–1256. (in Chinese)
- [3] 谢军红,柴 强,李玲玲,等. 有机氮替代无机氮对旱作全膜双垄沟播玉米产量和水氮利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1199–1206.
- [4] XIE J H, CHAI Q, LI L L, et al. Effects of the substitution of nitrogen by organic nitrogen fertilizer on maize grain yield and water and nitrogen use efficiency under plastic film fully mulched ridge–furrow in semi–arid area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1199–1206. (in Chinese)
- [5] 雍太文,刘小明,宋 春,等. 种植方式对玉米–大豆套作体系中作物产量、养分吸收和种间竞争的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(6): 659–667.
- [6] YONG T W, LIU X M, SONG C, et al. Effect of planting patterns on crop yield, nutrients uptake and interspecific competition in maize–soybean relay strip intercropping system[J]. *Chinese Journal of Eco–Agriculture*, 2015, 23(6): 659–667. (in Chinese)
- [7] 王红丽,张绪成,于显枫,等. 半干旱区氮肥运筹对全膜双垄沟播玉米水肥利用和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 449–458.
- [8] WANG H L, ZHANG X C, YU X F, et al. Effects of optimal nitrogen fertilizer management on water and fertilizer utilization efficiency and yield under double–ridge–furrow sowing with whole plastic film mulching in maize in a semi–arid area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(2): 449–458. (in Chinese)
- [9] 谢军红,柴 强,李玲玲,等. 黄土高原半干旱区不同覆膜连作玉米产量的水分承载时限研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(8): 1558–1568.
- [10] XIE J H, CHAI Q, LI L L, et al. The time loading limitation of continuous cropping maize yield under different plastic film mulching modes in semi–arid region of Loess Plateau of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(8): 1558–1568. (in Chinese)
- [11] 赵允格,邵明安,张兴昌. 成垄压实施肥对氮素运移及氮肥利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2004(1): 68–72.
- [12] ZHAO Y G, SHAO M A, ZHANG X C. Impact of localized compaction and ridge fertilization on field nitrate transport and nitrate use efficiency[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004(1): 68–72. (in Chinese)
- [13] BI L D, ZHANG B, LIU G R. Long–term effects of organic amendments on the rice yields for double rice cropping systems in subtropical China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, 129(4): 55–63.
- [14] 徐宗贵,孙 磊,王 浩,等. 种植密度对旱地不同株型春玉米品种光合特性与产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(13): 2463–2475.
- [15] XU Z G, SUN L, WANG H, et al. Effects of planting density on photosynthetic characteristics and yield of different variety types of spring maize on dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(13): 2463–2475. (in Chinese)
- [16] 唐文雪,马忠明,王景才. 施氮量对旱地全膜双垄沟播玉米田土壤硝态氮、产量和氮肥利用率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 58–63.
- [17] TANG W X, MA Z M, WANG J C. Effects of nitrogen rate on soil nitrate–N, yield and nitrogen use efficiency of double–ridge furrow sowing with full plastic film mulching for maize in dryland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(6): 58–63. (in Chinese)
- [18] 陈 鸽,汤春纯,李祖胜,等. 不同施肥措施对洞庭湖区旱地肥力及作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(5): 689–697.
- [19] CHEN G, TANG C C, LI Z S, et al. Influence of different fertilization modes on soil fertility and crop yield in Dongting Lake upland areas[J]. *Chinese Journal of Eco–Agriculture*, 2017, 25(5): 689–697. (in Chinese)
- [20] LI Z H, CHUN L Y, LIN Q Y, et al. Establishing dynamic thresholds for potato nitrogen status diagnosis with the SPAD chlorophyll meter[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(1): 190–195.
- [21] 李合生. 生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [22] ZHANG C F, PENG S B, PENG X X, et al. Response of glutamine synthetase isoforms to nitrogen sources in rice (*Oryza sativa* L.) roots[J]. *Plant Science*, 1997, 125: 163–170.
- [23] LIN C C, KAO C H. Disturbed ammonium assimilation is associated with growth inhibition of roots in rice seedlings caused by NaCl[J]. *Plant Growth Regulation*, 1996, 18: 233–238.
- [24] 吴良欢,蒋式洪,陶勤南. 植物转氨酶活性比色测定方法及其应用[J]. 土壤通报, 1998, 29(3): 136–138.
- [25] WU L H, JIANG S H, TAO Q N. Colorimetric determination of activity of plant transaminase(GOT and GPT) and its application[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1998, 29(3): 136–138. (in Chinese)
- [26] 谢 军,赵亚南,陈轩敬,等. 有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3934–3943.
- [27] XIE J, ZHAO Y N, CHEN X G, et al. Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20): 3934–3943. (in Chinese)
- [28] 曹 靖,胡恒觉. 不同肥料组合对冬小麦水分供需状况的研究[J]. 应用生态学报, 2000(5): 713–717.
- [29] CAO J, HU H G. Effect of different fertilizer combinations on water supply–demand status of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000(5): 713–717. (in Chinese)
- [30] XU C M, WANG D Y, CHEN S, et al. Effects of aeration on root

- physiology and nitrogen metabolism in rice[J]. Rice Science, 2013, 20(2): 148–153.
- [19] 吕 鹏, 张吉旺, 刘 伟, 等. 施氮时期对高产夏玉米氮代谢关键酶活性及抗氧化特性的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1591–1598.
- LÜ P, ZHANG J W, LIU W, et al. Effects of nitrogen application period on the nitrogen metabolism key enzymes activities and antioxidant characteristics of high-yielding summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(6): 1591–1598. (in Chinese)
- [20] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 419–425.
- WANG X J, JIA Z K, LIANG L Y, et al. Effects of organic fertilizer application rate on leaf photosynthetic characteristics and grain yield of dryland maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(2): 419–425. (in Chinese)
- [21] 马正波, 唐会会, 王庆燕, 等. 矮壮素配合氮肥基施对夏玉米氮代谢及氮素利用特征的影响[J]. 玉米科学, 2020, 28(4): 130–136.
- MA Z B, TANG H H, WANG Q Y, et al. Effects of chlormequat chloride on summer maize nitrogen metabolism and nitrogen utilization efficiency[J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(4): 130–136. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)