

覆盖作物和氮素用量对玉米产量及光合特性的影响

吕艳杰¹, 郑培峰², 孙梦璟¹, 张 珊¹, 王永军¹, 王立春¹, 史永晖³, 魏雯雯¹

(1. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130033; 2. 江苏香河农业开发有限公司, 江苏 连云港 222048;

3. 济南市农业技术推广服务中心, 济南 250023)

摘 要:通过2种覆盖作物和5个氮素用量大田试验, 探讨氮素和覆盖作物对玉米产量和光合特性的影响。随氮素用量增加, 玉米产量先升高后趋于稳定, 75 kg/hm²氮处理有效穗数最大, 225 kg/hm²氮处理穗粒数和百粒重最大; 低氮水平下, 黑麦覆盖玉米产量最大。覆盖作物增加玉米花后20 d前的叶绿素含量, 且提高了高氮处理开花后20~40 d的叶片光合速率; 黑麦覆盖显著增加玉米中、上部叶面积。光能利用差异主要在花后40 d, 氮素用量225~300 kg/hm²时黑麦覆盖最大光化学效率(F_v/F_m)、光化学淬灭(qP)和表观电子传递速率(ETR)均高于玉米单作。综上, 玉米-覆盖作物系统的玉米低氮量处理增产幅度大, 高氮量处理产量高; 以黑麦覆盖处理较好。

关键词: 玉米; 覆盖作物; 氮素用量; 产量; 光合特性

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Effect of Cover Crops and Nitrogen Application Rate on Maize Yield and Photosynthetic Characteristics

LÜ Yan-jie¹, ZHENG Pei-feng², SUN Meng-jing¹, ZHANG Shan¹, WANG Yong-jun¹,

WANG Li-chun¹, SHI Yong-hui³, WEI Wen-wen¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033;

2. Jiangsu Xianghe Agriculture Development Co., Ltd., Lianyungang 222048;

3. Jinan Agricultural Technology Extension Service Center, Jinan 250023, China)

Abstract: A two-factor, two cover crops(CC: *Brassica napus* and *Secale*) and five nitrogen rate(N: 0, 75, 150, 225, 300 kg/ha), randomized block experiment was conducted to investigate the effects of N rate and CC on maize yield and photosynthetic characteristics in a CC-maize system. The results indicated that maize yield initially increased with increasing N rate. For both CC, the highest number of effective ears was observed at 75 kg/ha, while the highest number of grains per ear and 100-kernel weight were observed at 225 kg/ha. Under low N rate, the highest maize yield were observed, in the *Secale* treatment. CC increased the pigment content 20 days before tasselling, and increased photosynthetic rate under higher N rate 40 days after tasselling. Particularly, the *Secale* treatment significantly increased the leaf area of the middle and upper leaves. Differences in light utilization were mainly observed 40 days after flowering. At N rate of 225–300 kg/ha, the *Secale* treatment exhibited the highest maximum photochemical efficiency(F_v/F_m), photochemical quenching(qP), and apparent electron transport rate(ETR) compared to CK. Conclusively, the N rate and CC remarkably enhanced the increase amplitude of yield under the lower N rate and increased the yield under the higher N rate. The CC improved maize yield in the second year, and *Secale* was recommended.

Key words: Maize; Cover crop; N application rate; Yield; Photosynthetic characteristic

录用日期: 2023-11-20

基金项目: 吉林省农业科技创新工程(CXGC2021ZY001)、吉林省科技发展计划人才项目(20220508096RC)、国家玉米产业技术体系岗位专家(CARS-02-19)

作者简介: 吕艳杰(1977-), 吉林舒兰人, 博士, 研究员, 主要从事玉米栽培生理研究。E-mail: lvyanjie_1977@163.com

郑培峰为本文共同第一作者。E-mail: zclanhao@163.com

史永晖和魏雯雯为本文通信作者。

提高作物单产水平和土地利用效率是保障国家粮食安全的关键^[1]。东北作为我国重要的玉米商品粮基地,生产中长期采用连作种植模式^[2],高产主要靠化肥、农药和水资源的高投入驱动^[3]。大量资源投入会降低作物养分利用效率,增加农田养分损失,导致土壤肥力和作物养分吸收量下降^[4]。因此,在保障作物产量水平的前提下调整种植模式,降低养分损失,提高养分效率,减少化学氮肥投入,是当前东北玉米生产亟待解决的问题。

在玉米种植系统中引入覆盖作物是在兼顾产量前提下实现农业可持续生产的新策略^[5]。在玉米收获后土地进入休耕阶段时,地面上的覆盖作物可吸收土壤残留氮,向下一季作物提供养分,有助于提高粮食产量^[6]。在玉米-覆盖作物系统中,物种间可能存在竞争、互补或促进^[7]。当主栽作物与覆盖作物生长需求存在时期差异时,彼此间不发生竞争,形成互补优势^[8]。同时,间套作提高了作物对光照、温度、水分、肥料等资源的利用效率,有效提高了初级生产力^[9,10]。当前,国外覆盖作物发展日益受到重视,尤其在美国和欧洲等区域发展迅速。黑麦(*Secale cereale* L.)和油菜(*Brassica napus* L.)是北美广泛应用的冬季耐寒覆盖作物^[11]。黑麦属禾本科,极耐寒,种植黑麦可减少土壤侵蚀、吸收土壤盈余氮素,减少氮淋溶损失^[12];油菜属十字花科,生长速度快、主根大、抗冻性强^[13],可产生足够生物量以减少土壤侵蚀,其冬季地面覆盖率超过80%^[14]。

国内集中在南方双季稻与覆盖作物轮作、果树林下覆盖作物种植、西南地区玉米大豆间作种植、华北地区玉米-覆盖作物轮作、西北干旱区玉米绿肥间套作研究等方面^[15-18]。东北地区的研究与应用较为薄弱,已有研究主要集中在覆盖作物的适应性评价、农田水土保持和养分循环方面^[19,21]。有关主栽作物-覆盖作物系统中主栽作物农艺性状、光合生

理方面研究较少。本研究探明不同玉米-覆盖作物系统中玉米农艺性状、光能利用和产量对氮水平响应的差异,确定适宜的氮肥水平,解析不同玉米-覆盖作物系统主栽作物产量提升的生理机制,探讨玉米-覆盖作物种植模式在东北的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2021-2022年在吉林省农业科学院公主岭试验站(124°49' E, 43°31' N, 海拔201 m)开展,该区属温带大陆性季风气候,年均日照时数2 867 h,全年活动积温2 885℃·d,年均无霜期146 d。该区域种植制度为1年1熟,土壤类型为黑土。

1.2 试验设计

采用覆盖作物种类与氮肥用量二因素随机区组设计,采用宽窄行种植模式(宽行90 cm,窄行40 cm),覆盖作物种植于玉米宽行处。覆盖作物选取甘蓝型油菜(C1)和黑麦(C2)2种覆盖作物,以玉米单作(CK)为对照。施氮用量设为0(N0)、75(N75)、150(N150)、225(N225)和300(N300)kg/hm² 5个水平,共15个处理,每个处理3次重复,小区面积39 m²。供试玉米品种为富民985,2021年4月27日播种,2022年5月7日播种,种植密度为70 000株/hm²。覆盖作物于2021年8月20日和2022年8月15日种植,2021年秋季玉米收获后,覆盖作物自然越冬;2022年玉米播种前采用小型翻耕机械将覆盖作物翻入土壤,并进行土壤旋耕(15 cm),玉米种植于条带旋耕土壤种床处(图1)。试验各处理磷钾肥用量均为P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²,于3叶期(V3)开沟深施;氮肥分两次按照1:1施用,于3叶期(V3)和12叶期(V12)开沟深施。试验用尿素含N量为46.0%,过磷酸钙含P₂O₅为44.0%,硫酸钾含K₂O为50.0%。试验采集样品时间均为2022年玉米生长季。

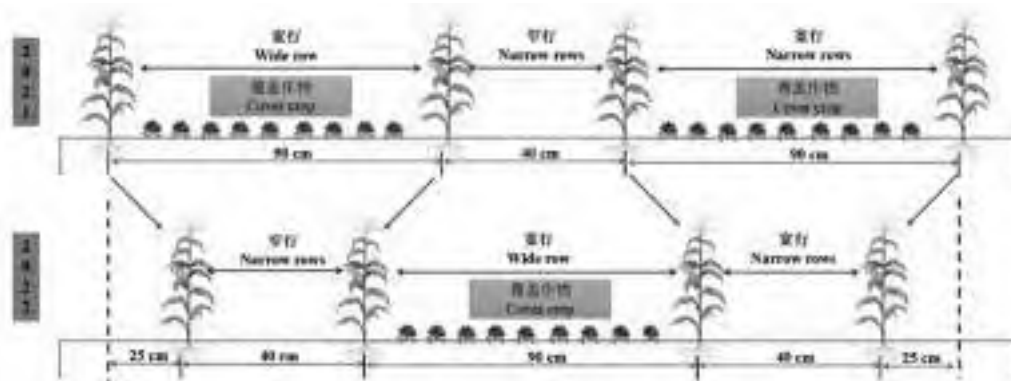


图1 玉米-覆盖作物种植模式图

Fig.1 Maize-cover crop planting pattern

1.3 测定项目与方法

在开花期(Vt)于各小区选取长势一致的植株3株,每10 d测定1次,获得植株展开叶的叶长(L)、叶宽(W)。

单叶叶面积 $LA=L\times W\times 0.75$;

叶面积指数(LAI)=(LA×整株叶片数×单位土地面积内的株数)/单位土地面积。

每个小区选取3株长势均匀的代表性植株,于Vt、花后20 d、花后40 d使用Li-6400XT便携式光合仪,选择晴朗无云的上午9:00~12:00,在1 800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 光照强度、500 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ CO_2 浓度和80% H_2O 浓度条件下测定穗位叶净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)。每个小区选取3株具有代表性玉米植株,于Vt、花后20 d、花后40 d使用FMS-2便携脉冲调制式荧光仪(Hansatech, UK)选择晴朗无云的上午9:00~12:00,测定暗适应参数PS II最大光化学效率(F_v/F_m)、PS II激发能捕获效率(F_v'/F_m')、光化学淬灭(qP)和表观电子传递速率(ETR)。于Vt、花后20 d、花后40 d,取荧光测定时期相近玉米植株穗位叶,用7 mm打孔器打圆叶10片,用95%乙醇溶液黑暗处提取48 h,采用分光光度计测定其在663 nm、549 nm和470 nm下的吸光值(OD值),根据公式计算叶绿素a(Chl a)、叶绿

素b(Chl b)、叶绿素a/b和总叶绿素含量。

在成熟期(R6),每个处理小区选取中间4行、每行3 m长,收获全部果穗称重,计算平均单穗重,按照平均单穗重从每个处理中选择10个均匀穗,风干后考种,记录穗行数与行粒数,计算穗粒数,采用烘干法测定子粒水分含量与百粒重,计算产量(按14.0%含水量计)。

农学氮肥利用效率(ANUE)=(施氮处理子粒产量-不施氮处理子粒产量)/施氮量

1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2019处理数据,运用SPSS 25统计软件对数据进行方差分析(ANOVA)和多重比较(Duncan法),通过计算Pearson相关系数确定测定指标之间的相关关系,应用Origin 2019软件作图。

2 结果与分析

2.1 覆盖作物与氮素用量对玉米单株叶面积的影响

氮肥和覆盖作物及二者互作对玉米单株叶面积影响极显著(表1)。随氮肥水平增加,不同覆盖作物处理单株叶面积在整体上呈先增加后缓慢降低趋势,在N225处理时稳定。除N0处理外,C2处理单株叶面积在其他氮水平下均高于CK处理(16.28%、

表1 覆盖作物与氮肥互作对玉米形态指标影响的方差分析(F值)

Table 1 Analysis of variance (ANOVA) on the effect of cover crop and N fertilizer intercropping on maize morphological indicators(F value)

指标 Index	氮肥(N) Nitrogen fertilizer	覆盖作物(C) Cover crop	N×C
Vt上部叶面积(ULA)	612.99**	156.78**	142.73**
Vt中部叶面积(MLA)	90.60**	24.19**	8.55**
Vt下部叶面积(LLA)	656.56**	31.55**	137.71**
Vt单株叶面积(PLA)	692.85**	62.51**	47.74**

注:**表示在0.01水平上差异显著;*表示在0.05水平上差异显著。下表同。

Note: **, $p<0.01$; *, $p<0.05$. Same below.

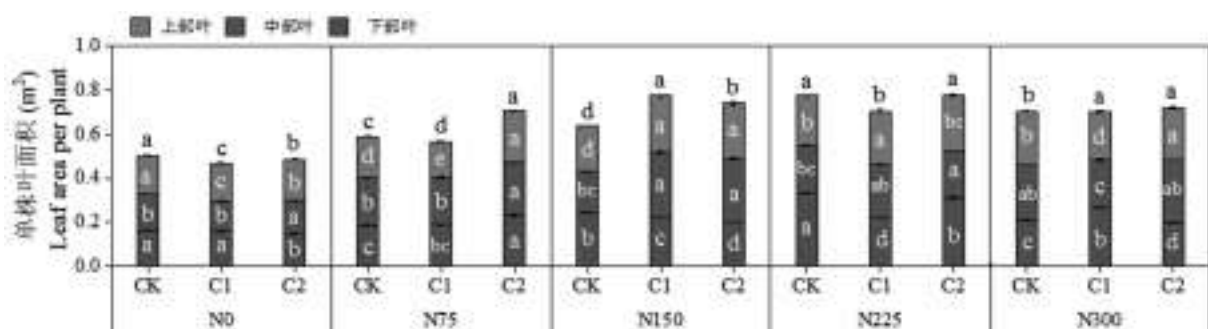


图2 覆盖作物与氮肥对玉米单株叶面积的影响

Fig.2 Effect of cover crop and N fertilizer intercropping on leaf area of maize monocots

13.75%、0.43%和2.18%)。上部叶面积,除N300处理外,C2处理在其他氮水平均高于CK(7.66%、10.35%、16.82%和10.57%)。当施氮量小于150 kg/hm²时,中部叶面积变化与单株叶面积变化相同;N225处理时,C1处理高于CK和C2处理(10.88%和11.98%);N300处理时,C2处理高于CK和C1处理(11.79%和24.58%)。不同覆盖作物处理的下部叶片变化无明显规律。施氮后,C2处理对氮肥变化响应更敏感,CK和C2、C1处理相比,其各部位叶面积达到峰值的氮肥需求更大(图2)。

2.2 覆盖作物与氮素用量对玉米光合特性的影响

氮肥、覆盖作物和生育时期单一效应及因子间交互效应对 P_n 、 G_s 和 T_r 影响显著或极显著,氮肥和生

育时期单一效应与交互效应对 C_i 影响极显著。开花后随生育时期推进,各处理 P_n 、 G_s 和 T_r 逐渐下降, C_i 逐渐升高(图3)。在开花期至花后20 d,相同覆盖作物处理 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 随施氮量增加呈上升趋势。开花期C2处理 C_i 在施氮量N225以下均低于CK和C1,以N75处理最显著,分别降低35.76%和32.10%。花后20 d时,高氮处理下玉米-覆盖作物系统C1和C2处理的 P_n 、 G_s 和 T_r 均高于CK,以N300处理最显著,分别提高13.36%和15.40%、16.71%和24.43%、34.51%和31.66%;花后40 d时,相同氮肥水平下,各处理差异较小。与CK相比,C1和C2处理可提高玉米开花期光合能力及花后20~40 d时高氮水平下叶片 G_s 、 C_i 和 T_r 。

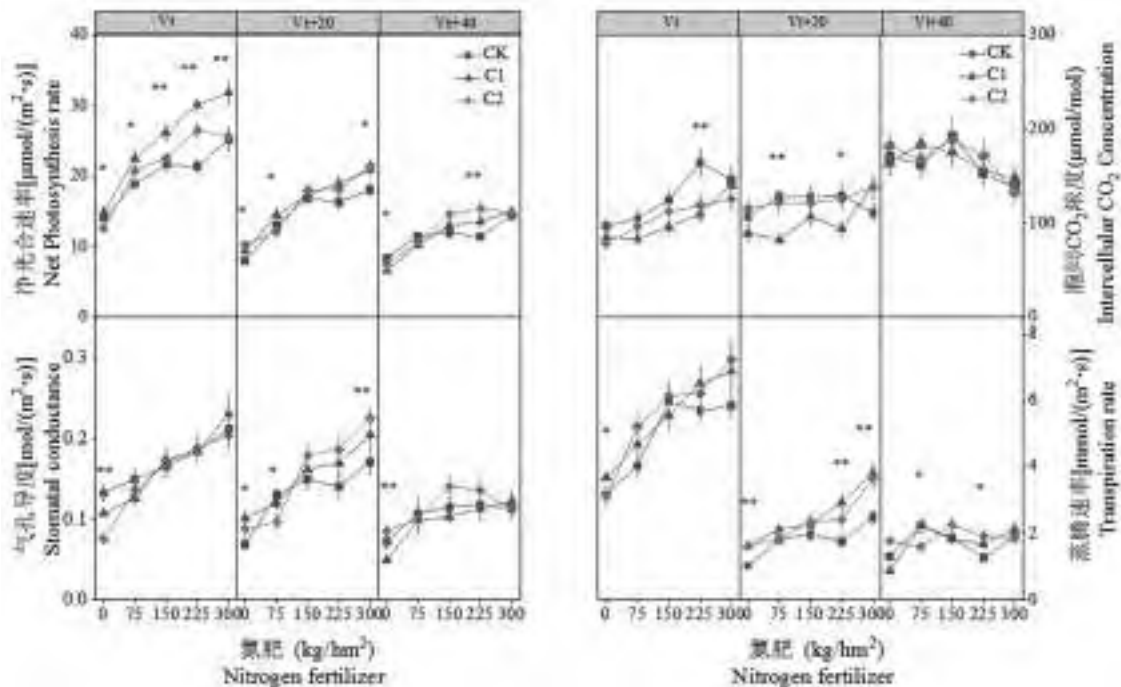


图3 覆盖作物与氮肥对玉米光合特性的影响

Fig.3 Effect of cover crop and N fertilizer intercropping on photosynthetic characteristics of maize

2.3 覆盖作物与氮素用量对玉米叶片叶绿素含量的影响

氮肥、覆盖作物和生育时期单一效应及因子间交互效应对Chl a、Chl b和Chl (a+b)影响极显著,氮肥和覆盖作物单一效应与交互效应对Chl (a/b)影响极显著。随生育时期推进,开花期至花后20 d,各处理Chl a、Chl b、Chl (a/b)和Chl (a+b)无显著变化,花后20~40 d时Chl a、Chl b和Chl (a+b)逐渐降低,Chl(a/b)无显著变化。不同时期各处理Chl a、Chl b和Chl (a+b)均随氮用量增加呈先增加后稳定的趋势(图4)。C1和C2处理可提高玉米叶片光合色素含量,在开花后20 d仍有显著效果,但花后40 d差异不显著。

2.4 覆盖作物与氮素用量对玉米荧光动力学参数的影响

覆盖作物和生育时期单一效应及二者交互效应对 F/F_m 、 F_v'/F_m' 和 ETR 影响显著或极显著,氮肥与覆盖作物交互效应和氮肥、覆盖作物、生育时期交互效应对 F/F_m 、 qP 和 ETR 影响显著。开花后随生育时期推进,各处理 F/F_m 、 F_v'/F_m' 、 qP 和 ETR 逐渐下降(图5)。开花至花后20 d,各处理 F/F_m 、 F_v'/F_m' 、 qP 和 ETR 整体上变化较小,低氮处理显著高于高氮处理。花后40 d,高氮水平下,C2处理的 F/F_m 、 F_v'/F_m' 和 qP 均高于CK,以N225处理最为显著,分别提高10.98%、13.68%和16.57%; ETR 在高氮水平下C1和C2处理

显著高于CK(15.70%和14.89%、14.18%和13.69%)。开花至花后20 d,PSII系统未受显著影响;花后40 d

时,C1和C2与CK相比,提高高氮水平下玉米叶片 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、qP和ETR。

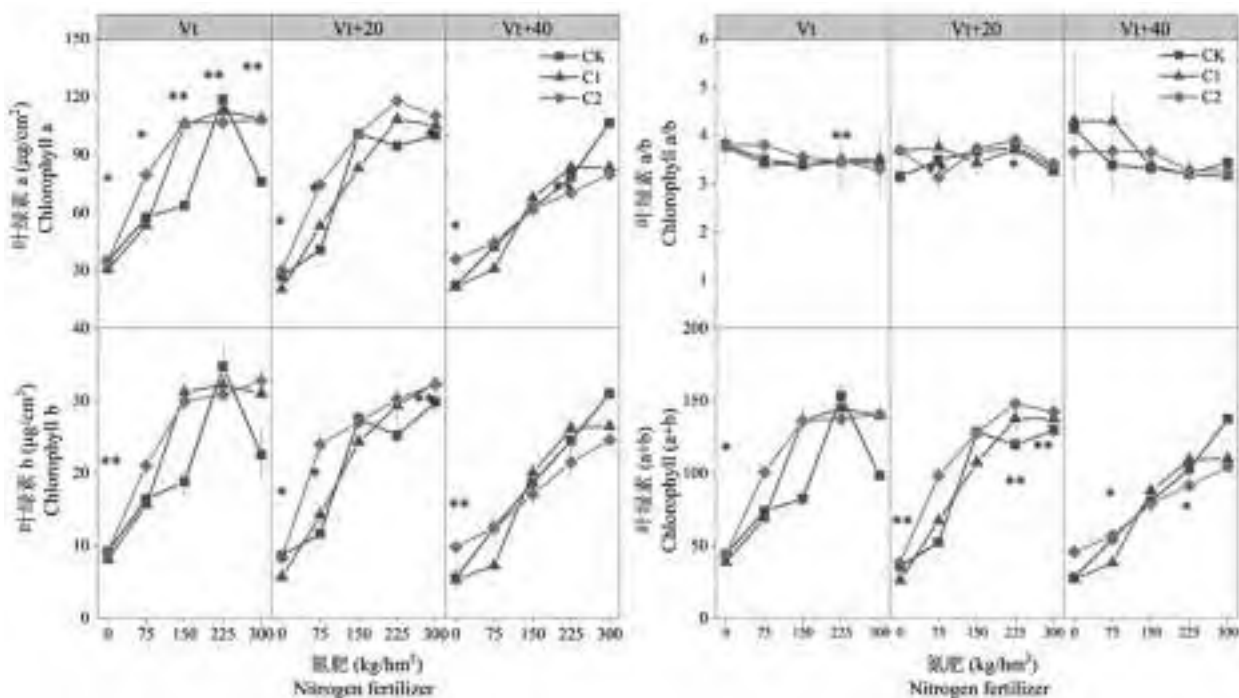


图4 覆盖作物与氮肥对玉米叶绿素含量的影响

Fig.4 Effect of cover crop and N fertilizer intercropping on chlorophyll content of maize

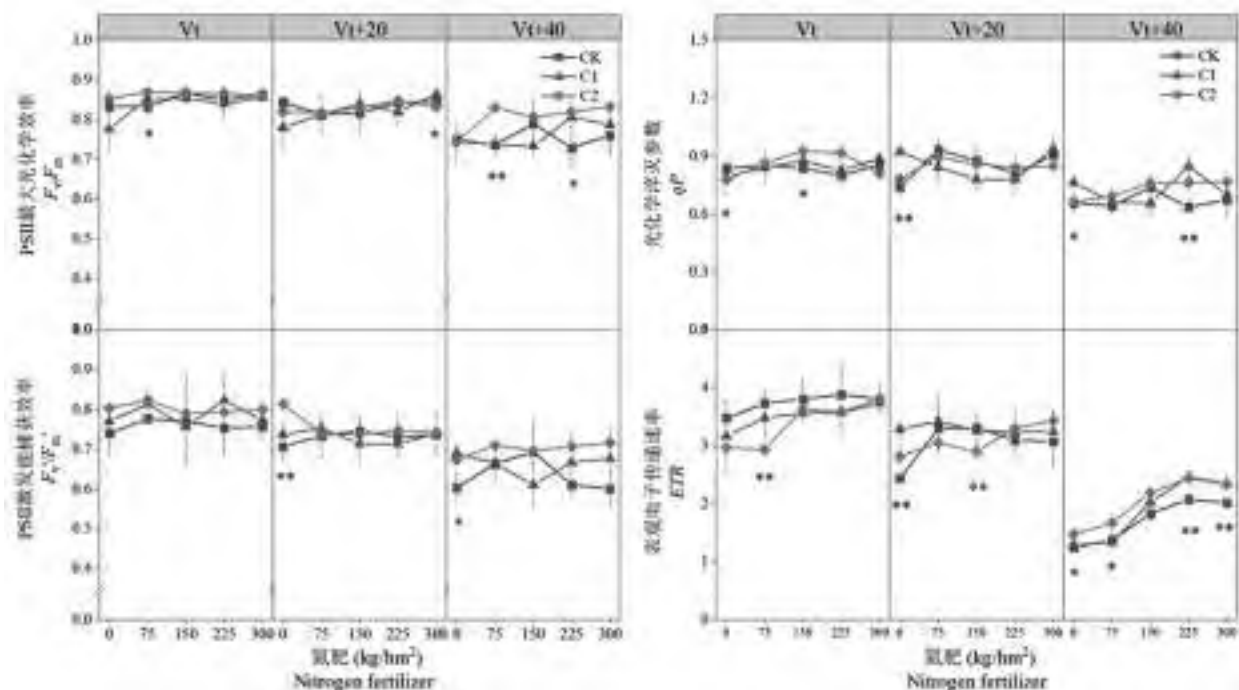


图5 覆盖作物与氮肥对玉米荧光动力学参数的影响

Fig.5 Effect of cover crop and N fertilizer intercropping on fluorescence kinetic parameters of maize

2.6 覆盖作物与氮素用量对玉米产量构成因素的影响

氮肥对有效穗数、穗粒数、百粒重和产量影响极显著,覆盖作物对有效穗数和穗粒数影响显著,氮肥

和覆盖作物交互效应对有效穗数、穗粒数和产量影响显著(表2)。随施氮量增加,各处理有效穗数、穗粒数、百粒重和产量呈先升高后趋于稳定趋势,有效穗数在N75处理达到稳定,穗粒数和百粒重在N225

表2 覆盖作物与氮肥对玉米产量及产量构成的影响
Table 2 Effect of cover crop and N fertilizer intercropping on maize yield and yield components

氮 肥 Nitrogen fertilizer	覆盖作物 Cover crop	有效穗数(穗/hm ²) Productive ears per hectare	穗粒数 Kernels per ear	百粒重 (g) 100-kernel weight	产 量 (t/hm ²) Yield	平均农学氮肥 利用效率 AANUE
N0	CK	39 583±1 909 a	355.35±15.88 a	25.36±0.78 b	3.28±0.26 b	—
	C1	4 0417±1 909 a	378.67±26.07 a	25.40±0.59 b	3.56±0.26 ab	—
	C2	42 917±2 602 a	412.64±7.87 a	27.64±0.50 a	4.48±0.29 a	—
N75	CK	66 667±2 602 a	488.29±4.87 b	28.17±0.75 b	8.25±0.31 b	66.27
	C1	66 500±901 a	489.47±2.72 b	27.67±0.35 b	8.2±0.18 b	61.87
	C2	65 833±2 602 a	523.52±12.07 a	31.99±0.73 a	10.16±0.57 a	75.73
N150	CK	63 750±1 250 b	591.78±12.19 a	32.98±0.36 a	11.57±0.35 a	55.27
	C1	69 583±722 a	576.12±16.74 a	33.42±1.37 a	12.31±0.80 a	58.33
	C2	66 250±3 307 ab	576.76±10.93 a	32.79±0.32 a	11.46±0.41 a	46.53
N225	CK	68 333±2 887 a	602.34±9.93 a	34.75±0.97 a	13.23±0.50 a	44.22
	C1	64 583±722 a	564.22±17.50 a	33.85±0.32 a	11.31±0.49 b	34.44
	C2	68 333±1 909 a	581.61±16.9 a	34.48±1.15 a	12.82±0.56 ab	37.07
N300	CK	66 667±1 909 a	607.98±2.32 a	35.39±0.11 a	13.07±0.21 a	32.63
	C1	68 750±2 165 a	612.08±8.97 a	31.57±2.65 a	12.31±0.82 a	29.17
	C2	67 917±2 602 a	596.13±7.62 ab	34.69±0.43 a	13.03±0.32 a	28.50
变异来源	氮肥(N)	226.80**	149.06**	39.83**	199.36**	—
	覆盖作物(C)	1.48	1.48	5.00*	4.28*	—
	N×C	2.73*	2.19	1.88	2.50*	—

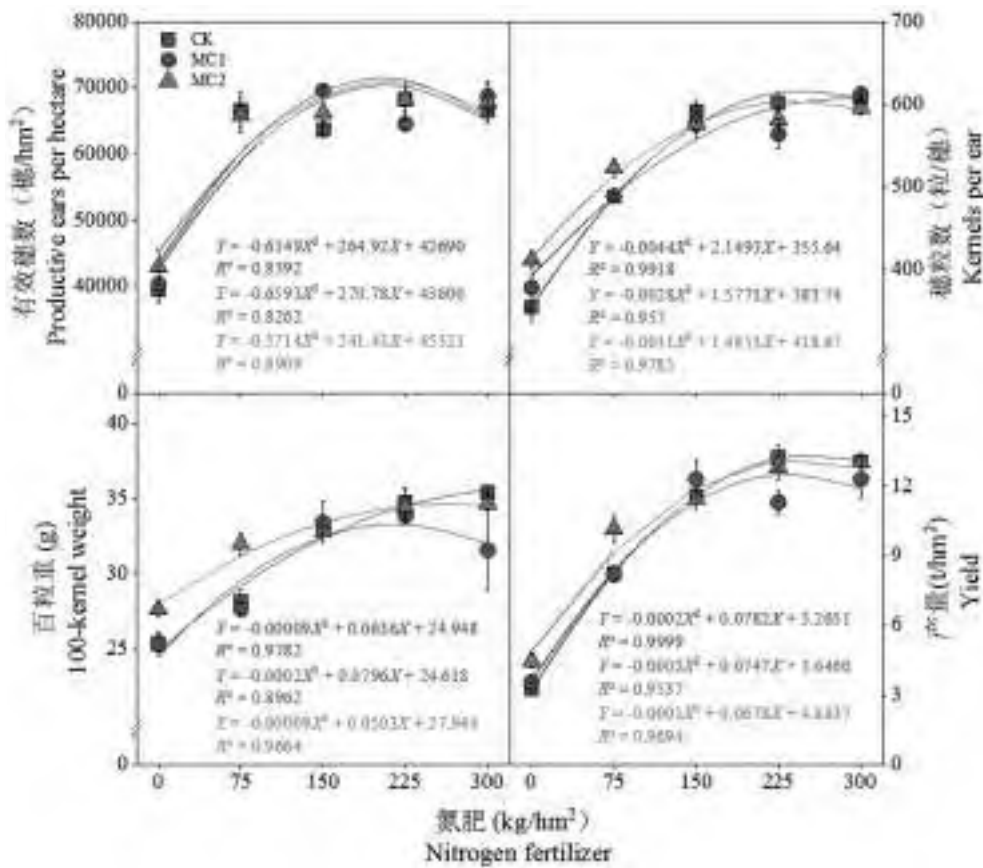


图6 不同覆盖作物模式下玉米产量及产量构成与氮肥梯度方程拟合

Fig.6 Fit of maize yield and yield components with N fertilizer gradient equation under different cover crop patterns

处理时达到稳定。同一氮肥水平下,CK、C1和C2处理有效穗数差异不显著。C2处理穗粒数在N75处理时显著高于CK和C1处理(6.73%和6.50%)。C2处理百粒重在N0和N75处理均显著高于CK和C1处理(8.25%和8.10%,11.94%和13.50%)。产量在N0和N75处理时差异明显,C2处理显著高于CK和C1处理(26.79%和20.54%,18.80%和19.29%)。不同覆盖作物处理间产量差异集中体现在较低氮水平,C2处理增产效果最明显。

将氮肥水平与产量及其构成因素进行二次函数拟合(图6),有效穗数、穗粒数、百粒重和产量随氮肥水平增加呈先增加后下降趋势,不同指标间峰值存在差异。各处理间有效穗数和穗粒数达最大潜力时需氮量差异较小,差异主要在粒重,CK处理粒重达最大时需氮量远超C1和C2处理。C1和C2处理的单位重量子粒需氮较高;C2处理较CK和C1处理获得最大产量时需氮量更高,其产量在高氮条件下相应较高。

3 结论与讨论

种植覆盖作物对主栽作物生产力有重要影响,主要体现在叶面积、生物量、植物养分吸收、产量等方面^[22]。叶面积由叶生长动态决定,高度依赖氮供应^[23,24]。本研究中,CK处理与C1和C2处理相比,各部位叶面积达到峰值的氮肥需求更大。高氮条件下,覆盖作物具有较高的叶面积,增加玉米中、上部的光能截获率^[25]。

氮素用量直接影响光合效率、酶活性和蛋白质合成,从而影响产量。与对照相比,玉米-覆盖作物系统中,开花期5个氮供应水平玉米光合能力均显著提高。高氮水平处理,花后20~40 d玉米叶片 G_s 、 C_i 和 T_r 显著提高。C2处理提高了开花期和花后20 d玉米叶片中叶绿素含量,提高叶片光合载体含量; P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 与Chl a、Chl b和Chl(a+b)呈显著正相关。通过增加叶片叶绿素含量、扩大叶片面积,提高玉米光合能力。因此,种植覆盖作物提高玉米光合能力途径与氮素调节有一定关联。叶绿素荧光反映了植物遭受胁迫程度或衰老进度,各处理荧光参数 V_t 和 V_t+20 差异较小,叶绿素PSII整体上未受到胁迫;在 V_t+40 时,C1、C2处理与CK相比,提高了高氮水平下玉米叶片 F/F_m 、 F_v'/F_m' 、 qP 和 ETR ,减轻了叶片PSII系统受到的损伤。种植覆盖作物可减缓玉米生长后期叶片衰老,进而对光合特性和叶绿素含量有积极影响^[26]。玉米光合速率提高,很大程度上提高了群体的光合生产力^[27]。种植覆盖作物通过调节

植株形态特征,减缓叶片衰老,增加截获面积,延长截获时间,从而提高光能利用率。

减少施氮量,覆盖作物对产量的增加效应在10年后才逐渐趋于稳定,在初期阶段,作物产量的稳定性远低于传统耕作方式^[28]。因此,覆盖作物对农田的生态价值需长期试验验证。有研究发现,在间套作模式下,生物量和产量提高可能是不同物种对资源需求的差异性造成。覆盖作物在玉米生育后期种植,在很大程度上避免物种之间由于具有相似时间生态位而发生的激烈竞争,降低了由于竞争而造成的损失。覆盖作物的增加,会在时间和空间尺度上吸收农田资源,在恰当时间予以释放。本研究中,C1和C2处理单位重量的子粒氮素投入较高,短期相同氮投入下,产量差异较小,但C2处理较CK和C1处理获得最大玉米产量时需氮量更高,因而其产量在高氮条件下更有潜力。构建复杂间套作系统,平衡土壤氮供应和植物吸收关系,是实现物种间氮素互补的有效途径。

氮素用量和覆盖作物显著影响玉米叶面积和光合参数,覆盖作物增加了玉米花后20 d前的叶绿素含量,且显著提高了高氮处理开花后20~40 d的叶片光合速率,光能利用差异主要在花后40 d开始显现。玉米-覆盖作物系统的玉米低氮条件下的增产幅度较大,高氮条件下的子粒产量高。种植覆盖作物第二年即提高玉米产量,以黑麦覆盖较为理想,能有效提高玉米光合作用和光能利用效率。

参考文献:

- [1] TILMAN D, CASSMAN K G, MATSON P A, et al. Agricultural sustainability and intensive production practices[J]. *Nature*, 2002, 418 (6898): 671-677.
- [2] 王永军,吕艳杰,刘慧涛,等.东北春玉米高产与养分高效综合管理[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(20): 3533-3535.
WANG Y J, LÜ Y J, LIU H T, Integrated management of high-yielding and high nutrient efficient spring maize in Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(20): 3533-3535. (in Chinese)
- [3] GUO S, ZHU H, DANG T, et al. Winter wheat grain yield associated with precipitation distribution under long-term nitrogen fertilization in the semiarid loess plateau in China[J]. *Geoderma*, 2012, 189: 442-450.
- [4] FENG C, SUN Z X, ZHANG L Z, et al. Maize/peanut intercropping increases land productivity: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2021, 270: 108208.
- [5] 蹇述莲,李书鑫,刘胜群,等.覆盖作物及其作用的研究进展[J]. *作物学报*, 2022, 48(1): 1-14.
JIAN S L, LI S X, LIU S Q, et al. Research advances of cover crops and their important roles[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(1): 1-14. (in Chinese)
- [6] BALOTA E L, CALEGARI A, NAKATANI A S, et al. Benefits of

- winter cover crops and no-tillage for microbial parameters in a Brazilian Oxisol: A long-term study[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 197: 31–40.
- [7] GLAZE-CORCORAN S, HASHEMI M, SADEGHPOUR A, et al. Understanding intercropping to improve agricultural resiliency and environmental sustainability[J]. *Advances in Agronomy*, 2020, 162: 199–256.
- [8] WANG Y Z, ZHANG Y P, ZHANG H F, et al. Intercropping-driven nitrogen trade-off enhances maize productivity in a long-term experiment[J]. *Field Crops Research*, 2022, 287: 108671.
- [9] OFORI F, STERN W R. Cereal-legume intercropping systems[J]. *Advances in Agronomy*, 1987, 41: 41–90.
- [10] DUCHENE O, VIAN J F, CELETTE F. Intercropping with legume for agroecological cropping systems: complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, 240: 148–161.
- [11] DESIMINI S A, GIBSON K D, ARMSTRONG S D, et al. Effect of cereal rye and canola on winter and summer annual weed emergence in corn[J]. *Weed Technology*, 2020, 34(6): 787–793.
- [12] LACEY C, ARMSTRONG S. The efficacy of winter cover crops to stabilize soil inorganic nitrogen after fall-applied anhydrous ammonia[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(2): 442–448.
- [13] MARTINEZ-FERIA R A, KASPAR T C, Wiedenhoef M H. Seedling date affects fall growth of winter canola(*Brassica napus* L. 'Baldur') and its performance as a winter cover crop in central Iowa[J]. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 2016, 2(1): 1–7.
- [14] EBERLEIN C V, MORRA M J, GUTTIERI M J, et al. Glucosinolate production by five field-grown *Brassica napus* cultivars used as green manures[J]. *Weed Technology*, 1998, 12(4): 712–718.
- [15] 唐海明, 程凯凯, 肖小平, 等. 不同冬季覆盖作物对双季稻田土壤有机碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 465–473.
- TANG H M, CHENG K K, XIAO X P, et al. Effects of different winter cover crops on soil organic carbon in a double cropping rice paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2): 465–473. (in Chinese)
- [16] 李青梅, 张玲玲, 刘红梅, 等. 覆盖作物多样性对猕猴桃园土壤微生物群落功能的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(2): 351–359.
- LI Q M, ZHANG L L, LIU H M, et al. Effects of cover crop diversity on soil microbial community functions in a kiwifruit orchard[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(2): 351–359. (in Chinese)
- [17] ZHANG Z G, AN J, XIONG S W, et al. *Orychophragmus violaceus*-maize rotation increases maize productivity by improving soil chemical properties and plant nutrient uptake[J]. *Field Crops Research*, 2022, 279: 108470.
- [18] 李含婷, 柴强, 胡发龙, 等. 间作绿肥弥补减施氮肥引起的玉米产量损失[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(7): 1329–1340.
- LI H T, CHAI Q, HU F L, et al. Intercropping green manure with maize reduces nitrogen fertilizer input and stabilizes grain yield[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(7): 1329–1340. (in Chinese)
- [19] 蔡丽君, 张敬涛, 盖志佳, 等. 东北三江平原覆盖作物种植效果[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(10): 2736–2742.
- CAI L J, ZHANG J T, GAI Z J, et al. The planting effect of cover crop in Sanjiang Plain, Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(10): 2736–2742. (in Chinese)
- [20] 孙万仓, 裴新梧, 马骊, 等. 我国北方冬季覆盖作物研究进展及发展前景[J]. *中国农业科技导报*, 2022, 24(1): 128–136.
- SUN W C, PEI X W, M L, et al. Advances and outlook of winter cover crop development research in Northern China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(1): 128–136. (in Chinese)
- [21] 巴晓博, 隋鑫, 鲍雪莲, 等. 覆盖作物-玉米间作对土壤碳氮含量及相关酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2022, 53(3): 577–587.
- BA X B, SUI X, BAO X L, et al. Impacts of intercropping with cover crops and maize on soil carbon and nitrogen contents and related enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(3): 577–587. (in Chinese)
- [22] CHAI Q, QIN A Z, GAN Y T, et al. Higher yield and lower carbon emission by intercropping maize with rape, pea, and wheat in arid irrigation areas[J]. *Agronomy for Sustainable Development* volume, 2013, 34, 535–543.
- [23] JOVANOVIĆ Z, DJAKOVIĆ T, STIKIĆ R, et al. Effect of N deficiency on leaf growth and cell wall peroxidase activity in contrasting maize genotypes[J]. *Plant and Soil*, 2004, 265: 211–223.
- [24] VOS J, VAN DER PUTTEN P E L, BIRCH C J. Effect of nitrogen supply on leaf appearance, leaf growth, leaf nitrogen economy and photosynthetic capacity in maize(*Zea mays* L.)[J]. *Field Crops Research*, 2005, 93(1): 64–73.
- [25] GAO H X, ZHANG C C, VAN DER WERF WOPKE, et al. Intercropping modulates the accumulation and translocation of dry matter and nitrogen in maize and peanut[J]. *Field Crops Research*, 2022, 284: 108561.
- [26] FENG LY, RAZA M A, SHI J Y, et al. Delayed maize leaf senescence increases the land equivalent ratio of maize soybean relay intercropping system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2020, 118: 126092.
- [27] SIMKIN A J, LÓPEZ-CALCAGNO P E, RAINES C A. Feeding the world: improving photosynthetic efficiency for sustainable crop production[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2019, 70(4): 1119–1140.
- [28] NOURI A, LEE J, YODER D, et al. Management duration controls the synergistic effect of tillage, cover crop, and nitrogen rate on cotton yield and yield stability[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 301: 107007.

(责任编辑:姜媛媛)