



减源对不同密度春玉米开花后干物质及 氮、磷、钾积累转运的影响

曹玉军^{1,3}, 吴杨¹, 刘志铭¹, 崔红^{1,2}, 吕艳杰¹, 姚凡云¹, 魏雯雯¹, 王永军¹

(¹吉林省农业科学院农业资源与环境研究所/玉米国家工程实验室, 长春 130033; ²吉林农业大学农业资源与环境学院, 长春 130118;

³东北农业大学农学院, 哈尔滨 150030)

摘要:【目的】探讨叶源调减(“减源”)对不同密度群体的产量, 干物质及氮、磷、钾元素积累转运的影响, 以期对东北春玉米密植高产及养分利用效率的进一步提高提供理论依据。【方法】以生产上大面积种植的玉米品种先玉335为试验材料, 采用裂区试验设计, 主区为不同密度, 分别为常规生产种植(60 000株/hm²)和高密度种植(90 000株/hm²); 副区为不同减源强度处理, 于开花吐丝期将植株的每1片绿叶横剪1/2、1/3、1/4(用T1、T2、T3表示), 不剪叶为对照(CK), 测定吐丝期(减源后)至成熟期植株干物质及氮、磷、钾积累与转运情况。【结果】在常规生产种植密度下, 不同减源处理的穗粒数、百粒重、产量均较CK显著降低($P < 0.05$), 其中T1、T2、T3处理分别较CK平均减产32.1%、20.3%和11.9%; 而高密度处理, T3处理显著提高了穗粒数, 产量显著增加, 较CK增产7.7%。与CK相比, 不同减源处理均提高了营养器官干物质及氮、磷、钾养分转运率, 减源程度越大, 干物质与养分转运率越高, 其中在常规生产种植条件下, T1处理营养器官的氮、磷、钾转运率2年平均分别较CK提高25.4%、19.1%、10.7%, T2处理的分别提高14.3%、9.8%、5.2%, T3处理的分别提高19.0%、10.7%、8.4%; 在高密度种植条件下, T1处理营养器官的氮、磷、钾转运率2年平均分别较CK提高17.1%、12.8%、5.8%, T2处理的分别提高12.6%、8.0%、3.6%, T3处理的分别提高14.9%、11.3%、3.9%。常规生产种植条件下不同减源处理降低了籽粒中氮、磷、钾的积累量, 而高密度种植条件下适当减源, 籽粒中氮、磷、钾的积累量有所提高, 其中T3处理2年平均比CK提高11.8%、6.9%、6.1%, 而T1、T2处理籽粒氮、磷、钾积累量2年均值分别比CK降低20.4%、23.4%、20.0%和10.3%、15.6%、16.0%。【结论】高密度玉米群体存在叶片冗余, 适当减少叶源量(剪叶1/4), 促进了营养器官干物质和氮、磷、钾营养元素向籽粒的合理转运, 提高了成熟期籽粒氮、磷、钾营养元素的积累量, 显著提高产量。因此, 在玉米生产中合理增加密度, 在高密度群体下适当调减叶源量, 是春玉米进一步高产和养分高效的有效途径。

关键词: 春玉米; 不同密度; 减源; 干物质; 氮磷钾积累与转运

Effects of Sources Reduction on Accumulation and Remobilization of Dry Matter and Nitrogen, Phosphorus and Potassium of Spring Maize Under Different Densities After Flowering

CAO YuJun^{1,3}, WU Yang¹, LIU ZhiMing¹, CUI Hong^{1,2}, LÜ YanJie¹, YAO FanYun¹, WEI WenWen¹, WANG YongJun¹

(¹Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences/State Engineering Laboratory of Maize, Changchun 130033; ²College of Agricultural Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118;

³College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030)

收稿日期: 2018-10-13; 接受日期: 2018-12-20

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0300103, 2017YFD0300603)、国家自然科学基金(31701349)、国家玉米产业技术体系(CARS-02-16)、吉林省农业科技创新工程(CXGC2017ZY015)、吉林省科技发展计划(20160203004NY)

联系方式: 曹玉军, E-mail: caoyujun828@163.com. 通信作者王永军, E-mail: yjwang2004@126.com

Abstract: 【Objective】 The effects of source reduction on yield, dry matter, and nutrient accumulation and transport of nitrogen, phosphorus, and potassium under different density populations were discussed in this study, in order to provide more effective ways for further improvement of maize yield and nutrient use efficiency and to provide a reference for the selection and breeding of density-resistant varieties. **【Method】** The cultivar Xianyu335 was used for experimental material, which was planted most popularly in local production. A split plot design with three replicates was used in the experiment. The main plot was different densities with 60 000 plants/hm² (conventional density) and 90 000 plants/hm² (high density), respectively; The subplot was different sources reduction intensity by cutting the leaves of each plant by 1/2 (T1), 1/3 (T2), 1/4 (T3) and control (without cutting leaves) at silking stage. Dry matter weight and the contents of nitrogen, phosphorus, and potassium were determined, and dry matter and nutrient accumulation and transport were calculated. **【Result】** Under conventional planting density, the number of kernels per ear, 100-kernel weight, and grain yield were all decreased compared to the control under different levels of source reduction. Among them, the average yield of T1, T2 and T3 were 32.1%, 20.3% and 11.9% lower than that of the control in two years, respectively; Under high planting density, T3 treatment significantly increased the number of kernels per ear, which resulted in a significant increase in yield. The average yield in two years in T3 treatment was 7.7% higher than that of control. Compare with the control, the dry matter and the nutrients of nitrogen, phosphorus and potassium transport rate of vegetative organs were increased at different source reduction, the greater the source reduction, the higher the dry matter and nutrient transport rate. Under conventional planting density, the vegetative organs nutrients of nitrogen, phosphorus and potassium transport rate of T1, T2 and T3 were 25.4%, 19.1%, 10.7%, 14.3%, 9.8%, 5.2% and 19.0%, 10.7%, 8.4% higher than the control, respectively. While, under high planting density, the vegetative organs nutrients of nitrogen, phosphorus and potassium transport rate of T1, T2 and T3 were 17.1%, 12.8%, 5.8%, 12.6%, 8.0%, 3.6% and 14.9%, 11.3%, 3.9% higher than the control, respectively. Under conventional planting density, the differences of source reduction reduced the accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium nutrients in grains. While, under high planting density, the accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium nutrients in grains were increased at an appropriate source reduction level. The accumulation of nitrogen, phosphorus, and potassium were 11.1%, 6.9%, and 6.1% higher, respectively, than the control on average of two years under T3 treatment. But the nutrients of nitrogen, phosphorus and potassium under T1 and T2 treatments were 20.4%, 23.4%, 20.0% and 10.3%, 15.6%, 16.0% lower than the control, respectively. **【Conclusion】** Leaf redundancy existed in dense maize population, reduction the amount of leaf sources appropriately (cutting all the leaves by 1/4 of whole plant) promoted the dry matter, nitrogen, phosphorus and potassium nutrients transport rate from vegetative organs to the grain, and increased the accumulation of nitrogen, phosphorus, and potassium nutrients in grains at mature stage. Therefore, increasing the density reasonably should be adopted in maize production. Meanwhile, the appropriate reduction of leaf source volume under high density population should be an effective way to further increase high yield and efficient use of nutrients in spring maize.

Key words: spring maize; different densities; leaf area reduction; dry matter; N, P, K accumulation and transport

0 引言

【研究意义】在耕地资源有限、人口不断增加、粮食需求日益提高的背景下,进一步挖掘单产潜力仍是玉米栽培研究中面临的重大课题^[1-2]。玉米生产是田间条件下的群体生产过程^[3],在稳定单穗粒重或略有降低的情况下,增加种植密度,提高资源利用率,依靠群体发挥增产是获得高产的重要措施之一^[4-5]。然而,增加种植密度要有一定限度,密度过高致使叶片之间相互遮盖,冠层郁闭,叶片早衰,影响了玉米植株的光合作用及干物质积累与分配,限制了籽粒库的发育^[6-7]。此外,在高密度种植条件下,植株对光热资源的竞争加剧,使更多资源用于个体竞争能力增强^[8],其结果必然导致资源的重新分配,如叶片或根系的相对增大,从而过多消耗营养物质和能量,降低了物质

向生殖器官分配的比例,导致单株生产力下降^[8-9]。适度减少叶片冗余能够使作物对获取的有限物质和资源进行合理分配和利用,对实现作物增产及资源高效利用具有重要意义^[8]。**【前人研究进展】**去除过度生长的营养器官来合理调控群体结构、提高现存能量利用率、获得较高籽粒产量的研究已有较多相关报道。刘志全等^[10]研究结果表明,在高密度条件下通过剪叶适度降低叶面积指数有利于玉米产量的提高,当叶面积指数降为 5.5 时,产量比对照提高 16.6%。LIU 等^[11]在高密度条件下发现,通过去除玉米植株最上部 2 片叶可改善群体冠层内部的受光姿态并最终提高穗位叶净光合速率、穗位层光合有效辐射及叶片活性氧清除能力,协调了群体与个体的关系,从而提高了产量。XUE 等^[12]研究表明,去除穗位上部 3 片叶,提高了基部茎秆碳水化合物含量,从而增强了茎秆抗倒伏能力。

花前营养器官转运的氮、磷、钾是禾谷类作物籽粒中氮、磷、钾主要来源,促进营养器官积累的干物质和氮、磷、钾向籽粒转运,对实现玉米增产和养分高效利用具有重要作用^[13]。作物营养器官干物质和氮、磷、钾等营养元素的积累与转运不仅受品种特性、环境因子、播种日期、种植密度、养分和水分供应等因素影响^[14-18],而且也受植株生理状况如源的强弱、库的大小及流的畅通与否等内在因素影响^[19]。许蓓蓓等^[20]就利用剪叶疏花方法证明源库调节对常规粳稻营养器官储存物质的转运、籽粒灌浆结实率和千粒重有显著影响。【本研究切入点】针对玉米不同密度群体,在不同程度减源条件下,玉米干物质和氮、磷、钾养分积累与转运利用特性的研究鲜见报道。【拟解决的关键问题】本研究以生产上大面积种植的玉米品种先玉 335 为试验材料,

在常规生产密度和高密度种植条件下,于开花吐丝期进行不同程度的减源处理,解析叶源调减后对不同密度群体干物质分配及氮、磷、钾积累转运产生的影响,以期为玉米产量及养分利用效率的进一步提高提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2014 年和 2015 年在吉林省农业科学院哈拉海综合实验站(44°05'N, 124°51'E)进行,土壤类型为黑土,0—20 cm 耕层土壤有机质 25.1 g·kg⁻¹,全氮 1.6 g·kg⁻¹,速效磷 27.6 mg·kg⁻¹,速效钾 198.7 mg·kg⁻¹。生育期气象数据(平均温度、最高温度、最低温度、降雨量)通过试验点的自动气象站获取(图 1)。

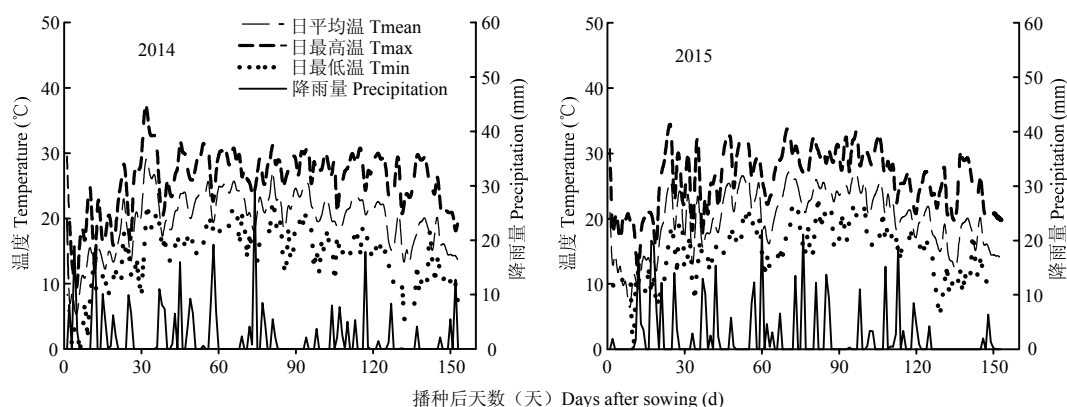


图 1 玉米生育期气象条件

Fig. 1 Meteorological conditions at growth stage of maize

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,主区为不同密度,分别为常规种植(60 000 株/hm²)和高密度种植(90 000 株/hm²);副区为不同减源处理,于开花吐丝期(果穗花丝全部抽出)进行 3 个减源强度处理,即将植株的每 1 片叶横剪 1/2 (T1)、1/3 (T2)、1/4 (T3),不剪叶为对照(CK),重复 3 次,小区行长 6 m,6 行区,行距 65 cm。供试品种为先玉 335,是目前生产上大面积推广应用的品种。2014 年 5 月 4 日播种,9 月 28 日收获,7 月 25 日进行不同强度的减源处理;2015 年 5 月 7 日播种,9 月 30 日收获,7 月 30 日进行不同强度的减源处理。减源后测定不同处理的叶面积,群体叶面积指数(表 1)。整个生育期施 N 300 kg·hm⁻²,

P₂O₅ 150 kg·hm⁻², K₂O 150 kg·hm⁻²,磷肥和钾肥做底肥一次性施入,氮肥分基肥、拔节肥 2 次施入,比例为 1:1。剪叶时准确且迅速,尽量减少植株其他部分的损伤,其他管理措施同一般生产田,整个生育期保证有良好的管理。

1.3 测试项目与方法

1.3.1 干物质积累 于剪叶后第 2 天及生理成熟期,每处理分别选取有代表性的植株 5 株,分叶片、茎秆(含穗轴和苞叶)、籽粒 3 部分,于 105°C 杀青 30 min,75°C 烘至恒重称重。将上述样品粉碎后用于养分测定。用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,并用 BüCHI 全自动凯氏定氮仪测定氮含量;钒钼黄比色法测定全磷含量;火焰光度法测定钾含量。

表 1 减源后不同处理群体叶面积指数
Table 1 The leaf area index (LAI) of different treatment groups after the source reduction

年份 Year	种植密度 Planting density ($\times 10^4$ plants/hm ²)	减源处理 Source reduction treatment	叶面积指数 LAI
2014	6.0	CK	5.52
		T1	3.11
		T2	3.56
		T3	4.15
	9.0	CK	7.36
		T1	4.02
		T2	5.04
		T3	6.22
2015	6.0	CK	5.82
		T1	3.30
		T2	3.91
		T3	4.31
	9.0	CK	7.19
		T1	3.84
		T2	4.85
		T3	6.16

1.3.2 养分积累 参照文献[21]的方法，计算花后营养器官（叶片和茎鞘）干物质（养分）转运量、转运率及其对籽粒的贡献率。

干物质（养分）转运量=开花期各营养器官干物质（养分）积累量-收获期各营养器官干物质（养分）积累量；

干物质（养分）转运率（%）=营养器官干物质（养分）转运量/开花期各营养器官干物质（养分）积累量 $\times 100$ ；

转运贡献率（%）=干物质（养分）转运量/成熟期产量（成熟期籽粒养分积累量） $\times 100$ 。

1.3.3 产量及产量构成因素 在玉米籽粒成熟期，选取每个小区中间 2 行进行人工收获，统计有效穗数，用均值法选取 10 穗，自然风干后进行室内考种，考察穗粒重、穗粒数、百粒重及含水量，产量按籽粒含水量 14%进行折算。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理，SPSS 17.0 软件进行方差分析，处理间平均数差异的显著性检验用 Duncan’s 法；采用 Sigmaplot 12.0 软件作图。

2 结果

2.1 不同减源处理对产量及其构成因素的影响

种植密度、减源处理对玉米产量均有极显著影响，且种植密度、减源处理间存在显著的交互作用（表 2）。2 年的试验结果表明，在 60 000 株/hm² 密度下，不同程度减源处理穗粒数、百粒重、产量均较 CK 降低，减源程度越大，各指标降低幅度越大，减源处理与 CK 差异均达显著水平，其中 T1、T2、T3 处理 2 年平均产量分别较 CK 降低 32.2%、20.3%、11.9%；秃尖长则随着减源程度的增加呈增加趋势，显著高于 CK，但各减源处理间差异不显著；在 90 000 株/hm² 密度下，穗粒数、百粒重、产量均表现为 T3>CK>T2>T1，其中 T3 处理产量显著高于与其他处理；而秃尖长的变化趋势与其他指标正好相反，表现为 T3 显著低于其他处理。T1 和 T2 处理 2 年平均产量分别较 CK 降低 19.3%、18.2%和 7.2%、7.6%，而 T3 处理平均产量较 CK 提高 7.7%。可见，较低密度条件下，减源减产，减源幅度越大，产量降低越大；而高密度条件下适当减源产量有所增加，且在减源强度相同的情况下，高密度减源减产的程度要低于低密度减源减产的程度，可见只有在高密度种植条件下减源才有利于玉米增产。

2.2 不同减源处理对花后干物质积累与转运的影响

不同减源处理对干物质积累与转运的影响如表 3 所示。2 年的结果表明，在 60 000 株/hm² 条件下，叶片、茎鞘干物质的转运量、转运率均随着减源程度的增加而提高，T1、T2、T3 处理叶片干物质转运率较 CK 平均分别提高 12.7、6.4、4.3 个百分点，茎鞘干物质转运率较 CK 平均分别提高 10.3、7.3、2.7 个百分点；在 90 000 株/hm² 条件下，叶片干物质转运量 2014 年表现为 T1 最高，CK 次之，T3 最低，其中 T1、CK、T2 处理间差异不显著，而与 T3 处理差异达显著水平；2015 年叶片干物质转运量表现为 T1>T2>CK>T3，各处理间差异不显著。茎鞘干物质转运量与转运率 2 年均表现为随着减源程度的增加而提高，其中 T3 处理与 CK 差异不显著，而 T1、T2 处理与 CK 差异达显著水平。

2.3 不同减源处理对花后营养器官氮、磷、钾元素转运的影响

从表 4 可看出，除不同年份间叶片和茎鞘元素转运率（氮、磷、钾），不同密度间叶片转运率（氮、钾）及不同减源处理间叶片钾素转运率差异不显著外

表 2 不同减源处理玉米产量及产量构成

Table 2 Effects of different source reduction on yield and yield components of maize

年份 Year	种植密度 Planting density ($\times 10^4$ plants/hm ²)	处理 Treatment	穗粒数 Grain number per ear	百粒重 100-kernel weight (g)	秃尖长 Bare tip length (cm)	产量 Yield (kg·hm ⁻²)
2014	6.0	CK	586.7a	33.6a	0.5c	11231.2a
		T1	478.7c	27.2c	3.7a	7676.1d
		T2	506.7c	30.4b	2.1b	8961.9c
		T3	548.0b	31.0b	1.9b	9840.6b
	9.0	CK	512.5b	30.5a	1.7a	12741.7b
		T1	490.5c	26.4b	2.4a	10283.9c
		T2	500.4b	28.8ab	2.0b	11825.9b
		T3	542.2a	31.7a	0.5b	13648.6a
2015	6.0	CK	560.7a	33.0a	0.4c	11047.8a
		T1	495.2c	26.1b	3.9a	7447.9d
		T2	502.3c	30.6b	2.0b	8798.4c
		T3	532.3b	32.3ab	1.8b	9790.3b
	9.0	CK	505.3b	31.4a	1.9a	12411.6b
		T1	476.7b	27.0b	2.4a	10149.1d
		T2	481.3b	29.0b	2.0a	11465.5c
		T3	539.3a	32.0a	0.6b	13444.8a
ANOVA	年份 Year	ns	ns	ns	ns	
	密度 Density (D)	*	*	ns	**	
	处理 Treatment (T)	*	*	*	**	
	密度×处理 (D×T)	**	*	ns	*	

数据后不同字母表示处理在 0.05 水平下差异显著。*和**分别表示显著水平 ($P<0.05$) 和极显著水平 ($P<0.01$)，ns 表示无显著差异。下同
Values followed by different letters are significantly different among the treatments at $P<0.05$. * and ** are significantly different at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively, ns means no significance. The same as below

($P>0.05$)，其他各处理氮、磷、钾转运率差异均达显著或极显著水平。与 CK 相比，不同密度条件下减源处理均提高了叶片和茎鞘氮、磷、钾矿质元素的转运率。以 2014 年为例，在 60 000 株/hm² 密度下，叶片氮素转运率 T1、T2、T3 处理分别比 CK 提高了 10.9、8.2、3.6 个百分点，磷转运率分别提高了 5.2、4.2、3.4 个百分点，钾素转运率分别提高了 9.2、5.6、3.4 个百分点；茎鞘氮素转运率 T1、T2、T3 处理分别比 CK 提高了 9.4、7.9、4.0 个百分点，磷素转运率分别提高了 9.6、5.7、1.2 个百分点，钾素转运率分别提高了 5.4、2.3、2.8 个百分点；在 90 000 株/hm² 密度下，叶片氮素转运率 T1、T2、T3 处理分别比 CK 提高了 8.4、2.7、1.8 个百分点，磷转运率分别提高了 3.5、2.4、3.0 个百分点，钾素转运率分别提高了 5.4、3.9、

2.0 个百分点；茎鞘氮素转运率 T1、T2、T3 处理分别比 CK 提高了 8.6、7.4、3.6 个百分点，磷素转运率分别提高了 8.7、7.1、2.3 个百分点，钾素转运率分别提高了 6.4、5.3、1.0 个百分点。可见，随着减源程度的增加，叶片和茎鞘氮、磷、钾元素转运率呈增加的趋势，在同一处理下，低密度养分转运率要高于高密度。

2.4 不同减源处理营养器官养分转运贡献率及成熟期养分积累

成熟期籽粒氮、磷、钾养分积累量不同处理间差异同干物质积累量基本一致（表 5），营养器官氮、磷、钾积累量及转运贡献率在不同年份间差异不显著，但密度、减源处理均达显著或极显著差异水平。在 60 000 株/hm² 密度下，氮、磷、钾养分积累量处理

表 3 不同减源处理干物质积累与转运

Table 3 Effects of different source reduction on dry matter accumulation and transport

年份	种植密度	处理	叶片干重		转运量	转运率	茎鞘干重		转运量	转运率
Year	Planting density	Treatment	Leaf weight (g)		Remobilization	Remobilization	Stem-sheath weight (g/plant)		Remobilization	Remobilization
	($\times 10^4$ plants/hm ²)		吐丝期	成熟期	(g/plant)	efficiency	吐丝期	成熟期	(g/plant)	efficiency
			Silking stage	Mature stage		(%)	Silking stage	Mature stage		(%)
2014	6.0	CK	46.0a	38.3a	7.7b	16.7d	136.2a	122.2a	14.0d	10.3c
		T1	30.5d	21.6d	8.9a	29.1a	136.3a	108.0c	28.5a	20.8a
		T2	38.0c	29.4c	8.6a	22.5b	136.1a	110.4c	25.6b	18.8a
		T3	42.0b	33.5b	8.5ab	20.3c	135.9a	117.1b	18.8c	13.7b
	9.0	CK	42.0a	35.5a	6.5a	15.9c	124.8a	108.1a	16.8c	13.4c
		T1	30.7d	24.0d	6.7a	21.8a	124.3a	100.7	23.7a	19.0a
		T2	33.5c	27.1c	6.4a	19.2b	125.0a	104.2	20.7b	16.6b
		T3	36.1b	30.2b	6.0b	16.5c	124.2a	106.5	17.7c	14.3c
2015	6.0	CK	45.4a	38.4a	7.0b	15.5d	140.9a	123.7	17.2d	12.2c
		T1	32.2d	23.0d	9.2a	28.4a	141.0a	109.7	31.3a	22.2a
		T2	38.8c	30.1c	8.7a	22.4b	140.5a	114.9	25.6b	18.2b
		T3	41.1b	32.7b	8.4ab	20.5c	141.1a	120.6	20.5c	14.5c
	9.0	CK	42.3a	35.8a	6.5a	15.3c	127.1a	110.6	16.5c	13.0c
		T1	30.3d	23.2d	6.9a	23.2a	127.1a	100.3	26.8a	21.1a
		T2	32.7c	26.0c	6.7a	20.5b	127.4a	104.3	23.2b	18.2b
		T3	36.7b	30.7b	6.1a	16.4c	127.5a	110.0	17.5c	13.7c

表 4 不同减源处理叶片和茎鞘氮、磷、钾养分转运率

Table 4 N, P and K nutrient remobilization efficiency in leaves and stem-sheath under different treatments

年份 Year	种植密度 Planting density (×10 ⁴ plants/hm ²)	处理 Treatment	氮 N (%)		磷 P (%)		钾 K (%)	
			叶片 Leaf	茎鞘 Stem-sheath	叶片 Leaf	茎鞘 Stem-sheath	叶片 Leaf	茎鞘 Stem-sheath
2014	6.0	CK	42.9	45.5	42.1	53.6	61.2	24.5
		T1	53.8	54.9	47.3	63.2	70.4	29.9
		T2	51.1	53.4	46.3	59.3	66.8	26.8
		T3	46.5	49.5	44.5	54.8	64.6	27.3
	9.0	CK	43.8	41.5	41.3	46.9	61.4	25.9
		T1	52.2	50.1	44.8	55.6	66.8	32.3
		T2	46.5	48.9	43.7	54.0	65.3	31.2
		T3	45.6	45.1	44.3	49.2	63.4	26.9
2015	6.0	CK	43.9	46.9	57.3	54.2	59.6	24.7
		T1	55.7	53.5	62.3	60.5	71.7	30.3
		T2	48.5	53.9	59.6	58.6	67.1	27.5
		T3	45.7	50.6	58.5	56.8	66.4	25.9
	9.0	CK	45.2	43.9	46.7	46.1	61.6	19.4
		T1	51.7	50.3	53.5	52.9	68.4	26.0
		T2	50.8	50.6	51.0	50.0	64.8	26.0
		T3	48.4	45.4	49.8	47.2	62.7	21.9
ANOVA	年份 Year	ns	ns	ns	ns	ns	*	
	密度 Density	ns	**	**	**	ns	*	
	处理 Treatment	**	**	ns	**	**	**	

表 5 不同处理籽粒氮磷钾积累及营养器官养分转运贡献率

Table 5 Effects of source reduction on N, P and K accumulation and the contribution of remobilized N, P and K to grain under different treatments

年份 Year	种植密度 Planting density (×10 ⁴ plants/hm ²)	处理 Treatment	成熟期籽粒 氮积累 Grain N at physiological maturity (g/plant)	营养器官 氮转运贡献 Proportion of remobilize N in grain from vegetative organs	成熟期籽粒 磷积累 Grain P at physiological maturity (g/plant)	营养器官 磷转运贡献 Proportion of remobilize P in grain from vegetative organs	成熟期籽粒 钾积累 Grain K at physiological maturity (g/plant)	营养器官钾 转运贡献率 Proportion of remobilize K in grain from vegetative organs
2014	6.0	CK	2.13	41.12	0.38	43.45	0.69	55.40
		T1	1.56	59.11	0.35	47.24	0.57	60.74
		T2	1.79	54.89	0.36	43.61	0.60	58.63
		T3	1.85	50.60	0.36	43.47	0.64	60.41
	9.0	CK	1.72	39.72	0.32	33.02	0.51	60.30
		T1	1.41	52.60	0.25	44.99	0.41	75.14
		T2	1.61	48.92	0.28	38.74	0.43	73.20
		T3	1.96	35.03	0.34	31.38	0.53	59.16
	2015	CK	2.15	42.64	0.35	46.56	0.67	54.30
		T1	1.58	61.20	0.29	54.72	0.49	73.12
		T2	1.87	52.84	0.33	48.54	0.54	63.18
		T3	1.92	48.77	0.34	49.24	0.57	59.92
ANOVA	9.0	CK	1.72	45.75	0.32	31.41	0.49	62.91
		T1	1.35	57.39	0.24	41.51	0.39	70.20
		T2	1.50	53.83	0.26	37.84	0.41	73.31
		T3	1.92	40.32	0.34	29.58	0.52	58.88
	年份 Year	年份	ns	ns	ns	ns	ns	ns
		密度 Density	**	**	*	**	**	*
		处理 Treatment	**	**	*	**	**	**

间均表现为 CK>T3>T2>T1，即随着减源程度的增加籽粒氮磷钾养分积累量逐渐降低，其中氮素积累量各处理间差异达显著水平；减源提高了营养器官养分转运贡献率，减源程度越大，转运贡献率越高；在 90 000 株/hm² 密度下，除 2014 年籽粒磷素积累量外，其他各处理氮、磷、钾养分积累量均表现为 T3>CK>T2>T1，而营养器官养分转运贡献率处理间则表现为 T1>T2>CK>T3。即在高密度种植条件下，减源 1/4 处理营养器官养分贡献率相对较低，说明籽粒中更多营养元素来自作物根系的吸收。

3 讨论

玉米作为 C₄ 作物，高产潜力巨大。单纯通过提高单穗重增加单产的潜力有限，玉米产量是田间条件下

的群体生产过程，依靠群体发挥增产潜力是获得高产的重要途径之一，而种植密度是调控群体最简单最有效的栽培措施^[22]。在生产上选用茎叶夹角小、株型紧凑的玉米品种来增加种植密度是玉米实现高产突破的重要途径^[23]。本研究结果表明，玉米产量不同处理间均表现为高密度种植高于常规密度，差异达显著或极显著水平，说明增加种植密度是提高玉米产量的重要措施之一。进一步研究表明，在常规种植密度（60 000 株/hm²）条件下，不同减源处理均显著降低了玉米产量，减源程度越大，产量越低；而在高密度（90 000 株/hm²）条件下，减源 1/4 可以显著提高玉米产量，2 年较 CK 平均增产 7.7%。可见，高密度种植条件下玉米叶片确实存在一定冗余，去除冗余对产量提高有利，这也验证了前人在夏玉米上的研究结果^[24]。

玉米籽粒产量的物质来源主要由两部分组成: 一部分是开花后直接运输到籽粒中的同化产物和开花后形成的暂贮藏性物质的再转移; 另一部分是开花前生产的同化物暂贮藏于营养器官中, 在灌浆期再转移到籽粒中^[25]。光合产物在营养器官积累及转运的多少是籽粒产量形成的重要物质基础, 前人研究表明, 春玉米产量在很大程度上取决于生育后期的光合产物同化能力, 但叶片与茎鞘的干物质转移与分配也是玉米籽粒产量形成的重要因素^[18,25]。营养器官干物质转移与分配不仅受基因型、环境、栽培措施影响, 同时也受源库调节手段等影响。ZHANG 等^[26]通过源库调节试验发现剪叶处理显著提高了不同小麦品种营养器官干物质的转运率, 而疏花处理则抑制了营养器官干物质转运率。本研究结果表明, 不同减源处理均提高了玉米剩余叶片转运率和茎鞘干物质的转运量及转运率, 弥补了因减源造成的光合产物供应量的减少, 从而使籽粒灌浆进程正常进行。在 60 000 和 90 000 株/hm² 条件下, 减源 1/2、1/3、1/4 叶片干物质转运率 2 年的平均值分别达到 28.8%、22.4%、20.4%和 22.5%、21.5%、17.5%, 可见减源程度越大, 干物质的转运率越高, 但干物质转运率并非越高越好, 刘克礼等^[27]研究指出春玉米向籽粒转移的营养体干物质比率应控制在 20%以下, 超过 20%会导致叶片早衰, 籽粒灌浆期缩短, 产量下降。可见, 只有适当提高营养器官干物质转运率才有利于产量的进一步提高。

氮、磷、钾养分转运与吸收是籽粒养分积累的两大来源, 其含量高低直接影响着作物生长发育状况, 从而影响作物的产量^[28]。本研究结果表明, 不同种植密度玉米叶片和茎秆中氮、磷、钾养分的转运率及养分转运贡献率对花后不同程度减源处理反应较敏感。与对照相比, 所有减源处理均提高了茎秆和剩余叶片氮、磷、钾养分转运率, 减源程度越大, 养分转运率越高。但前人研究已证实, 若灌浆期从营养器官中转移过高的氮素会导致玉米叶片衰老进程加快、光合能力下降^[29]。有关籽粒养分的积累, 先前的研究发现密植条件下适当去掉玉米植株穗位上部 2 片叶, 降低了籽粒总氮积累量^[30]。本研究中发现低密度下, 不同程度减源降低了籽粒中氮、磷、钾养分的积累; 而在高密度下适当减源, 籽粒中氮、磷、钾的积累量有所提高, 减源 1/4 处理氮、磷、钾养分积累 2 年均值分别比对照提高 11.8%、6.9%、6.1%, 而减源 1/2、1/3 处理, 籽粒氮、磷、钾积累量两年均值分别比对照降低 20.4%、23.4%、20.0%和 10.3%、15.6%、16.0%。据

此, 高密度 T3 处理下更高的氮、磷、钾积累可以解释为适当减源促进了营养器官营养元素向籽粒的转运, 同时在灌浆期间可能为根系提供了更多的光合产物, 增加了根系对氮、磷、钾养分的吸收, 从而提高了成熟期籽粒养分积累量, 最终获得了更高的籽粒产量。而关于减源对密植玉米叶源光合性能和根源吸收特性的协调机制研究将是我们以后重点开展的工作。

本研究对玉米高产研究有两方面借鉴意义, 一是可为耐密性品种选育提供一定的理论基础, 在生产中我们将尽可能选育叶片较小的耐密性品种; 其次是在栽培技术上我们可以通过合理增加密度、在高密群体下应用化学物质来减少叶面积的无效生长, 例如在适宜的时间喷施适当浓度的植物生长调节剂等。

4 结论

高密度玉米群体存在叶片冗余, 适当减少叶源量(剪叶 1/4)促进了营养器官干物质和氮、磷、钾营养元素向籽粒的合理转运, 提高了成熟期籽粒氮、磷、钾营养元素的积累量, 显著提高产量。因此, 在玉米生产中合理增加密度, 在高密度群体下适当调减叶源量, 是春玉米进一步高产和养分高效的有效途径。

References

- [1] 曹玉军, 吕艳杰, 王晓慧, 魏雯雯, 姚凡云, 刘春光, 王立春, 王永军. 基于 Hybrid-maize 模型的吉林省不同生态区玉米产量潜力研究. 中国生态农业学报, 2016, 24(7): 926-934.
CAO Y J, LÜ Y J, WANG X H, WEI W W, YAO F Y, LIU C G, WANG L C, WANG Y J. Analysis of yield potential of maize in different ecological regions in Jilin Province using Hybrid-maize model. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(7): 926-934. (in Chinese)
- [2] 王立春, 边少锋, 任军, 刘武仁. 提高春玉米主产区玉米单产的技术途径研究. 玉米科学, 2010, 18(6): 83-85.
WANG L C, BIAN S F, REN J, LIU W R. Study on technique way to increase unit area yield in the main production zone of spring maize. *Journal of Maize Sciences*, 2010, 18(6): 83-85. (in Chinese)
- [3] 赵松岭, 李凤民, 张大勇, 段舜山. 作物生产是一个种群过程. 生态学报, 1997, 17(1): 100-104.
ZHAO S L, LI F M, ZHANG D Y, DUAN S S. Crop production is a population process. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(1): 100-104. (in Chinese)
- [4] TOKATLIDIS I S, KOUTROUBAS S D. A review of maize hybrids' dependence on high plant populations and its implications for crop

- yield stability. *Field Crops Research*, 2004, 12: 103-114.
- [5] 冯海娟, 张善平, 马存金, 刘鹏, 董树亭, 赵斌, 张吉旺, 杨今胜. 种植密度对夏玉米茎秆维管束结构及茎流特性的影响. *作物学报*, 2014, 40(8): 1435-1442.
- FENG H J, ZHANG S P, MA C J, LIU P, DONG S T, ZHAO B, ZHANG J W, YANG J S. Effect of plant density on microstructure of stalk vascular bundle of summer maize (*Zea mays* L.) and its characteristics of sap flow. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(8): 1435-1442. (in Chinese)
- [6] 卫丽, 熊友才, 马超, 张慧琴, 邵阳, 李朴芳. 不同群体结构夏玉米灌浆期光合特征和产量变化. *生态学报*, 2011, 31(9): 2524-2531.
- WEI L, XIONG Y C, MA C, ZHANG H Q, SHAO Y, LI P F. Photosynthetic characterization and yield of summer corn (*Zea mays* L.) during grain filling stage under different planting pattern and population densities. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(9): 2524-2531. (in Chinese)
- [7] FATEMEH F, MANI M, SHAHRAM L. The effect of source-sink restriction and plant density changes on the role of assimilate remobilization in corn grain yield. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 2013, 5(20): 2459-2465.
- [8] ROSSINI M A, MADDONNI G A, OTEGUI M E. Inter-plant competition for resources in maize crops grown under contrasting nitrogen supply and density: Variability in plant and ear growth. *Field Crops Research*, 2011, 121: 373-380.
- [9] 韩明春, 吴建军, 王芬. 冗余理论及其在农业生态系统管理中的应用. *应用生态学报*, 2005, 16(2): 375-378.
- HAN M C, WU J J, WANG F. Redundancy theory and its application in agro-ecosystem management. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(2): 375-378. (in Chinese)
- [10] 刘志全, 徐晓敏, 沈海波, 孙俊华, 沈芳玉, 车树平, 王双越, 路立平. 高密度栽培条件下玉米剪叶处理对产量构成的影响. *玉米科学*, 2009, 17(6): 74-75.
- LIU Z Q, XU X M, SHEN H B, SUN J H, SHEN F Y, CHE S P, WANG S Y, LU L P. Effects of leaf cutting treatment to maize yield under the high plant population cultivation condition. *Journal of Maize Sciences*, 2009, 17(6): 74-75. (in Chinese)
- [11] LIU T N, GU L M, DONG S T, ZHANG J W, LIU P, ZHAO B. Optimum leaf removal increases canopy apparent photosynthesis, ¹³C-photosynthate distribution and grain yield of maize crops grown at high density. *Field Crops Research*, 2015, 170(1): 32-39.
- [12] XUE J, GOU L, SHI Z G, ZHAO Y S, ZHANG W F. Effect of leaf removal on photosynthetically active radiation distribution in maize canopy and stalk strength. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(1): 85-96.
- [13] 杨恒山, 张玉芹, 徐寿军, 李国红, 高聚林, 王志刚. 超高产春玉米干物质及养分积累与转运特征. *植物营养与肥科学报*, 2012, 18(2): 315-323.
- YANG H S, ZHANG Y S, XU S J, LI G H, GAO J L, WANG Z G. Characteristics of dry matter and nutrient accumulation and translocation of super-high-yield spring maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 315-323. (in Chinese)
- [14] 戴明宏, 赵久然, 杨国航, 王荣焕, 陈国平. 不同生态区和不同品种玉米的源库关系及碳氮代谢. *中国农业科学*, 2011, 44(8): 1585-1595.
- DAI M H, ZHAO J R, YANG G H, WANG R H, CHEN G P. Source-sink relationship and carbon-nitrogen metabolism of maize in different ecological regions and varieties. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(8): 1585-1595. (in Chinese)
- [15] 牟会荣, 姜东, 戴廷波, 曹卫星. 遮光对小麦植株氮素转运及品质的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1718-1724.
- MOU H R, JIANG D, DAI T B, CAO W X. Effects of shading on the nitrogen redistribution in wheat plant and the wheat grain quality. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1718-1724. (in Chinese)
- [16] 于吉琳, 聂林雪, 郑洪兵, 张卫健, 宋振伟, 唐建华, 林志强, 齐华. 播期与密度对玉米物质生产及产量形成的影响. *玉米科学*, 2013, 21(5): 76-80.
- YU J L, NIE L X, ZHENG H B, ZHANG W J, SONG Z W, TANG J H, LIN Z Q, QI H. Effect of matter production and yield formation on sowing date and density in maize. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(5): 76-80. (in Chinese)
- [17] 孙永健, 孙园园, 刘树金, 杨志远, 程洪彪, 贾现文, 马均. 水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响. *作物学报*, 2011, 37(12): 2221-2232.
- SUN Y J, SUN Y Y, LIU S J, YANG Z Y, CHENG H B, JIA X W, MA J. Effects of water management and nitrogen application strategies on nutrient absorption, transfer, and distribution in rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(12): 2221-2232. (in Chinese)
- [18] 戴明宏, 陶洪斌, 王利纳, 王璞. 不同氮肥管理对春玉米干物质生产分配及转运的影响. *华北农学报*, 2008, 23(1): 154-157.
- DAI M H, TAO H B, WANG L N, WANG P. Effects of different nitrogen managements on dry matter accumulation, partition and transportation of spring maize (*Zea mays* L.). *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(1): 154-157. (in Chinese)
- [19] ROMÁN A S, IGNACIO A, ROXANA S, GUSTAVO A S. Understanding grain yield responses to source-sink ratios during grain filling in

- wheat and barley under contrasting environments. *Field Crops Research*, 2013, 150(15): 42-51.
- [20] 许蓓蓓, 尤翠翠, 丁艳锋, 王绍华. 源库调节对常规粳稻花后营养器官碳水化合物及氮磷钾转运的影响. *中国农业科学*, 2016, 49(4): 643-656.
- XU B B, YOU C C, DING Y F, WANG S H. Effect of source-sink manipulation on translocation of carbohydrate and nitrogen, phosphorus, potassium in vegetative organs of conventional *Japonica* rice after anthesis. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(4): 643-656. (in Chinese)
- [21] 曹国军, 刘宁, 李刚, 杜立平, 陈世纪, 李可. 超高产春玉米氮磷钾的吸收与分配. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 198-201.
- CAO G J, LIU N, LI G, DU L P, CHEN S J, LI K. Study on absorption and distribution of nitrogen phosphorus and potassium in super-high yield spring maize. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 198-201. (in Chinese)
- [22] 杨吉顺, 高辉远, 刘鹏, 李耕, 董树亭, 张吉旺, 王敬锋. 种植密度和行距配置对超高产夏玉米群体光合特性的影响. *作物学报*, 2010, 36(7): 1226-1233.
- YANG J S, GAO H Y, LIU P, LI G, DONG S T, ZHANG J W, WANG J F. Effects of planting density and row spacing on canopy apparent photosynthesis of high-yield summer corn. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(7): 1226-1233. (in Chinese)
- [23] 杨今胜, 王永军, 张吉旺, 刘鹏, 李从锋, 朱元刚, 郝梦波, 柳京国, 李登海, 董树亭. 三个超高产夏玉米品种的干物质生产及光合特性. *作物学报*, 2011, 37(2): 355-361.
- YANG J S, WANG Y J, ZHANG J W, LIU P, LI C F, ZHU Y G, HAO M B, LIU J G, LI D H, DONG S T. Dry matter production and photosynthesis characteristics of three hybrids of maize (*Zea mays* L.) with super-high-yielding potential. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(2): 355-361. (in Chinese)
- [24] 郝梦波, 王空军, 董树亭, 张吉旺, 李登海, 刘鹏, 杨今胜, 柳京国. 高产玉米叶片冗余及其对产量和光合特性的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 344-350.
- HAO M B, WANG K J, DONG S T, ZHANG J W, LI D H, LIU P, YANG J S, LIU J G. Leaf redundancy of high-yielding maize (*Zea mays* L.) and its effects on maize yield and photosynthesis. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2): 344-350. (in Chinese)
- [25] 黄智鸿, 王思远, 包岩, 梁煊赫, 孙刚, 申林, 吴春胜. 超高产玉米品种干物质积累与分配特点的研究. *玉米科学*, 2007, 15(3): 95-98.
- HUANG Z H, WANG S Y, BAO Y, LIANG X H, SUN G, SHEN L, WU C S. Studies on dry matter accumulation and distributive characteristic in super high-yield maize. *Journal of Maize Sciences*, 2007, 15(3): 95-98. (in Chinese)
- [26] ZHANG Y H, SUN N N, HONG J P, ZHANG Q, WANG C, XUE Q W, ZHOU S L, HUANG Q, WANG Z M. Effect of source-sink manipulation on photosynthetic characteristics of flag leaf and the remobilization of dry mass and nitrogen in vegetative organs of wheat. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(8): 1680-1690.
- [27] 刘克礼, 刘景辉. 春玉米干物质积累分配与转移规律的研究. *内蒙古农牧学院学报*, 1994, 15(1): 1-9.
- LIU K L, LIU J H. A study on the regularity of accumulation, distribution and translation of dry matter in spring maize. *Journal of Inner Mongolia Institute of Agriculture and Animal Husbandry*, 1994, 15(1): 1-9. (in Chinese)
- [28] 王宜伦, 李潮海, 何萍, 金继云, 韩燕来, 张许, 谭金芳. 超高产夏玉米养分限制因子及养分吸收积累规律研究. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(3): 559-566.
- WANG Y L, LI C H, HE P, JIN J Y, HAN Y L, ZHANG X, TAN J F. Nutrient restrictive factors and accumulation of super-high-yield summer maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3): 559-566. (in Chinese)
- [29] LIU T N, HUANG R D, CAI T, HAN Q F, DONG S T. Optimum leaf removal increases nitrogen accumulation in kernels of maize grown at high density. *Scientific Reports*, 2017, 7: 39601.
- [30] 严云, 廖成松, 张福锁, 李春俭. 密植条件下玉米冠根生长抑制的因果关系. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 257-265.
- YAN Y, LIAO C S, ZHANG F S, LI C J. The causal relationship of the decreased shoot and root growth of maize plants under higher plant density. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 257-265. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)