植物营养与肥料学报 2010,16(2):266-273
Plant Nutrition and Fertilizer Science

不同施氮量及基追比例对玉米冠层生理性状和产量的影响

鱼 欢[1,2], 杨改河[1*], 王之杰[3]
(1 西北农林科技大学农学院,陕西杨凌 712100; 2 中国热带农业科学院香料饮料研究所,海南万宁 571533;
3 加拿大农业与农业食品部园艺研究与发展中心,St-Jean-sur-Richelieu, 加拿大魁北克, J3B3E6)

摘要: 以加拿大魁北克地区推广的玉米品种 Pioneer 38B84 为材料,研究不同施氮量和基追比例对玉米最上一片全展开叶 SPAD 值、Dualex 值、净光合速率(P_N)、叶面积指数(LAI)、地上部生物量、冠层叶绿素密度(SPAD × LAI)、冠层光合能力(P_N × LAI)以及产量的影响。试验设 5 个处理: N0(基 0 + 追 0)、N20 + 93 (基 20 kg/hm^2 + 追 93 kg/hm^2)、N45 + 68 (基 45 kg/hm^2 + 追 68 kg/hm^2)、N113 (基 113 kg/hm^2 + 追 0)和 SAT225[基 225(播种时施氮 45 kg/hm^2,播种后 10 d 再沟施 180 kg/hm^2) + 追 0],完全随机区组设计,重复 4 次,基本苗为 79000 株/hm^2。结果表明,追肥前,叶片 SPAD 值、P_N、LAI、地上部生物量、SPAD × LAI 及 P_N × LAI 均随基肥氮量的增加而增加,Dualex 值则降低。同等施氮量下,基肥配合追肥显著提高叶片 SPAD 值,而追肥对叶片 Dualex 值和 P_N 无显著影响。虽然基肥配合追肥处理的 LAI、地上部生物量、SPAD × LAI、P_N × LAI 在追肥后均显著低于氮肥一次性基施,但显著提高了玉米产量。基施氮肥 20 kg/hm^2 与 45 kg/hm^2 处理之间玉米产量无差异,但前者过早地表现出缺氮。总施氮量为 113 kg/hm^2 时,其 SPAD 值、Dualex 值、P_N、LAI、地上部生物量、SPAD × LAI 以及 P_N × LAI 等指标在出苗后 25~60 d 与 SAT225 处理差异不显著,但产量却显著低于 SAT225 处理。本试验条件下,基肥量 45 kg/hm^2 能较好地满足玉米前期生长,但总施氮量 113 kg/hm^2 不能满足玉米全生育期的需求,需要进一步地评估适宜的施氮量。同等施氮量下,基肥配合追肥显著提高玉米产量; SPAD 值和 Dualex 值均与玉米植株氮含量显著相关,SPAD 和 Dualex 可以作为实时快速指导玉米追肥的有效工具。

关键词: 施氮量; SPAD 值; Dualex 值; 冠层叶绿素密度; 冠层光合能力; 产量
中图分类号: S513.062　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008-505X(2010)02-0266-08

Nitrogen rate and timing considerations on yield and physiological parameters of corn canopy

YU Huan[1,2], YANG Gai-he[1*], WANG Zhi-jie[3]
(*1 College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Spice and Beverage Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agriculture Science, Wanning, Hainan 571533, China; 3 Horticulture Research and Development Centre, Agriculture and Agri-Food Canada, St-Jean-sur-Richelieu, Quebec J3B3E6, Canada*)

Abstract: One year corn field experiment was conducted at a research farm of Agriculture and Agri-Food Canada, located in L'Acadie, Quebec, Canada. The experiment was a completely randomized block design with five N treatments and four replications. The five N treatments received N 0, 20, 45, 113 and 225 kg/ha(N 45 kg/ha was applied at sowing, and N 180 kg/ha at 10 days after sowing), respectively, at sowing, and N 0, 93, 68, 0 and 0 kg/ha, respectively, at side-dressing, i.e. N0, N20 + 93, N45 + 68, N113, and SAT225. Corn density is 79000 plants/ha, and the cultivar is

收稿日期: 2009-03-31　　**接受日期**: 2009-06-15
基金项目: 北美地区玉米试验,加拿大农业与农业食品部(Agriculture and Agri-Food Canada), 加拿大肥料公司(Agrium company)项目; "十一五"国家科技支撑计划项目(2007BAD89B16)资助。
作者简介: 鱼欢(1982—),女,陕西西安人,博士,主要从事作物高产生态生理研究。E-mail: yhdwm2000@yahoo.com.cn
* 通讯作者 E-mail: ygh@nwsuaf.edu.cn
感谢加拿大农业与农业食品部园艺研究与发展中心的 Nicolas Tremblay 博士及其助手 Carl Bélec、Marcel Tétreault 和 Edith Fallon 在试验设计及实施过程中提供的帮助。

Pioneer 38B84. The results show that SPAD reading, P_N, LAI, aboveground dry biomass, canopy chlorophyll density (SPAD × LAI) and canopy photosynthetic capacity (P_N × LAI) are increased with basal N rates increasing before side-dressing, while Dualex reading is decreased. Compared to N113, SPAD readings in the N20 + 93 and N45 + 68 treatments are significantly increased. The split N applications have no significant influences on Dualex reading and P_N. The LAI, aboveground dry biomass, SPAD × LAI and P_N × LAI of N20 + 93 and N45 + 68 are significantly lower, but the grain yields are significantly higher than those of N113. There are no significant differences in corn grain yield between N20 + 93 and N45 + 68, however, the N deficiency is appeared earlier in N20 + 93 than in N45 + 68. No significant differences between N113, N20 + 93 or N45 + 68, on one hand, and SAT225, on the other hand, are observed in SPAD reading, Dualex reading, P_N, LAI, aboveground dry biomass, SPAD × LAI and P_N × LAI at 25-60 days after emergence, while corn grain yields of N113, N20 + 93 and N45 + 68 are significantly lower than that of SAT225. Split N application can significantly increase corn grain yield compared to only one application at sowing, and N45 + 68 is better than N20 + 93. Under our experimental condition, a total N application with N 113 kg/ha do not produce the same corn grain yield as SAT225. Both SPAD and Dualex readings show significant correlation with corn plant N concentration, and then can be used as an instant and non-destructive diagnostic tool for corn N status evaluation.

Key words: N application rate; SPAD reading; Dualex reading; canopy chlorophyll density; canopy photosynthetic capacity; corn grain yield

氮素是影响作物产量和品质的重要营养元素之一[1-3]。氮素供应不足会导致作物产量降低和经济损失,而过量施用氮素,不仅增加投入,而且增加土壤中硝态氮的积累和淋失,进而造成环境的污染[1,4-5]。虽然硝态氮的淋失、氨挥发以及硝化反硝化作用等途径造成的氮素损失不可能完全避免,但是通过氮素的合理运筹可以降低氮素的损失以及对环境的影响,同时提高经济效益[2]。

研究表明,在作物需要氮素的时期追施氮肥,如在作物出苗3—5周后追肥,可以显著提高产量和氮肥利用率[6-9]。相对于在播种时一次性施肥,氮肥分基追两次施入,可减轻淋失和反硝化作用造成的损失[6]。然而,有些研究表明分期施氮会降低玉米的产量[10-12],且在玉米生育期内施氮肥,收获后土壤中残留的硝态氮易于淋失,造成环境污染[10]。

不同供氮水平显著影响玉米叶片叶绿素含量、叶面积指数、叶片功能期和光合速率[13-15],适时适量供氮有利于提高光合速率和产量[16]。SPAD叶绿素计作为一种快速测定作物叶绿素水平的方法已在小麦、水稻、玉米等作物氮素营养诊断中推广应用[17-20]。多酚化合物是植物次生代谢的产物,当植株受到氮素胁迫时,叶片多酚含量增加[21]。最近研究表明,叶片多酚含量与叶片含氮量呈显著负相关,多酚可作为作物氮素状况诊断的一个指标。Dualex是通过用双重激发的叶绿素荧光测定叶表面紫外吸收率(375 nm)来评估叶片多酚化合物的一种新型便携式仪器[22],它利用反馈电路完全消除了可变叶绿素荧光的影响,使红光诱导的荧光水平和紫外光诱导的荧光水平相等,因此测定光强度不再受可变叶绿素荧光的影响,可在田间快速测定[22]。通过SPAD和Dualex仪测定叶绿素含量和多酚含量可实时、快速,并在不破坏植株生长的情况下评价作物氮素状况。

冠层叶绿素密度是评估大田作物氮素水平[23]、进行作物农情监测、生产管理、产量估计的重要指标。光合性能是作物产量形成的物质基础,高氮肥投入可引起冠层光合性能的下降。因此,适时适量施氮是提高冠层叶绿素密度和冠层光合性能,从而提高产量的一个重要途径。虽然关于不同施氮量对玉米叶绿素含量,光合速率,叶面积指数以及产量等方面的影响已有大量报道,但就不同基追氮肥量对玉米多酚含量、冠层叶绿素密度、冠层光合特性及产量等方面的影响还缺乏研究。本研究旨在通过研究不同施氮量及不同基追氮肥量对玉米叶片SPAD值、Dualex值、光合速率、地上部生物量、LAI、冠层叶绿素密度、冠层光合特性及产量的影响,探索不同施氮量及基追比例对玉米生长的影响,以期为氮肥的合理施用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验于2008年5月至10月在加拿大农业与农业食品部园艺研究与发展中心试验农场L'Acadie进行。该站位于加拿大东南部,45°17′N、73°20′W,海

拔47 m,年平均降水量1000 mm。试验地土壤为壤土,0—30 cm土层有机质37 g/kg、硝态氮2 mg/kg、有效磷71 mg/kg、有效钾121 mg/kg、pH值7.3。作物种植模式为一年一季。试验采用完全随机区组设计,4次重复。氮素处理设:播种时基施氮肥,用量为N 0、20、45、113 kg/hm^2;拔节期追施氮肥,用量分别为N 0、93、68、0 kg/hm^{2}等4个处理和氮饱和处理(即播种时施氮肥45 kg/hm^2,播种后10 d再沟施氮肥180 kg/hm^2),5个处理分别记为:N0、N20+93、N45+68、N113和SAT225。氮饱和处理为供氮量对于作物来讲处于奢侈或饱和吸收状态的参考小区,可以保证整个生育期内不缺氮。氮肥为缓释尿素(N 43%, Polymer-coated urea—Environmentally smart nitrogen)。拔节期追肥为出苗后42 d,6—7片全展开叶(V6—V7)[24];磷、钾肥分别施重过磷酸钙109 kg/hm^2、氯化钾63 kg/hm^{2}和硫酸钾镁肥170 kg/hm^2。小区面积16 m×3 m。供试品种为加拿大魁北克地区推广的玉米品种Pioneer 38B84,5月12日播种,每小区4行,行距75 cm,基本苗为7.9×10^{4}株/hm^2,整个生育期内不灌溉。

1.2 测定项目和方法

1.2.1 SPAD值测定 玉米出苗后,在每小区中间两行选择生长均匀一致的玉米10株,出苗后25 d开始,于上午8:30至12:00之间用SPAD叶绿素计(SPAD-502,日本产)测定最上面一片全展开叶的SPAD值,测定部位为玉米叶片长度的1/2处,叶片上表面,避开叶脉位置,叶脉两边各测一次,每小区共测20次,记录平均值。测定日期分别为出苗后25 d(V3—V4)、33 d(V4—V5)、40 d(V6—V7)和60 d(VT,雄穗出现)。

1.2.2 Dualex值测定 Dualex值是在SPAD测定的叶片及部位用Dualex仪器(Dualex3.3,法国产)测定。每小区测20次,取平均值。由于叶片上表面Dualex值与下表面Dualex值显著相关,在农业生产中可只测定叶片的一面[22,25],所以在本试验中只测定了最上面一片全展开叶上表面Dualex值。

1.2.3 净光合速率(P_N)的测定 采用LI-6400便携式光合仪(美国LI-COR公司产)在完成SPAD和Dualex测定的叶片中选4片用于P_N测定。叶温设定为27℃,流量为500 μmol/s,使用红蓝光源,光合有效辐射为1000 μmol/(m^2·s),使用CO_2钢瓶供气。待读数稳定时,每片叶记录一个P_N值,统计时取平均值。

1.2.4 叶面积指数(LAI)的测定 完成上述指标测定后,将中间两行1 m长范围内玉米植株贴地面剪断,地上部分植株带回实验室,使用LICOR LI-3100叶面积仪(美国LI-COR公司产)测定叶面积。每小区绿叶面积除以采样面积(1.5 m^2)即为LAI。

1.2.5 地上部分生物量和植株含氮量的测定 地上部分植株于通风烘箱内70℃烘干至恒重,称重得地上部分干物质重。烘干植株样品粉碎装在密封的塑料瓶中置于室温条件下待测,测定植株含氮量时用硫酸和亚硒酸对0.1 g粉碎后的样品进行矿化,参照Lachat15-501-3的方法使用流动注射自动离子分析仪QuikChem 8000(美国Lachat公司产)分析植株总氮含量[26]。

1.2.6 产量测定 使用联合收割机分别收获每小区中间两行玉米,收获长度为9.5 m,计算产量。

1.3 数据分析

冠层叶绿素密度(SPAD×LAI)为SPAD值与同一处理LAI的乘积;冠层光合能力(P_N×LAI)为P_N和同一处理LAI的乘积。

采用Microsoft Excel和SAS软件PROC MIXED程序进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 新展开叶SPAD值的变化

图1看出,追肥前,叶片SPAD值随着基施氮量的增加而增加。出苗后25—33 d(V3—V5),N0和N20+93处理间以及N45+68、N113和SAT225处理间SPAD值差异不显著。出苗后40 d(V6—V7),N45+68的SPAD值显著高于N0和N20+93,N113和SAT225显著高于其他处理;N113和SAT225处理间无差异。追肥后,N20+93和N45+68的SPAD值显著高于N0和N113。表明在施氮总量一定的条件下,分基肥和追肥两次施用可显著提高叶片SPAD值。追肥前后,叶片SPAD值与植株氮含量均呈显著正相关($P\leqslant0.001$)(表1)。不同施氮处理对玉米植株氮含量的影响见图2。

2.2 叶片Dualex值的变化

追肥前,叶片Dualex值随着施氮量的增加而降低(图3)。出苗后25 d(V3—V4),N20+93、N45+68和N113处理间,N45+68、N113与氮饱和处理(SAT225)间Dualex差异不显著;出苗后33 d(V4—V5),N20+93与N45+68,N45+68与N113间Dualex值差异均不显著;出苗后25—40 d(V4—V7),N0和N20+93间,N113和SAT225间Dualex值均无差异。

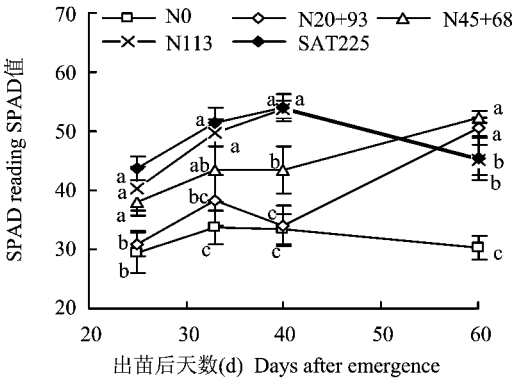

图 1　不同施氮处理对玉米叶片 SPAD 值的影响

Fig.1　Effects of N application levels and application times on SPAD reading of corn leaf

[注(Note):不同字母表示差异达 5% 显著水平($n=4$) Different letters mean significant at 5% level ($n=4$);出苗后 42 d 追肥 Side-dressing N was at 42 days after emergence]

追肥后,N20 + 93、N45 + 68 和 N113 处理间 Dualex 值无显著差异,且与 SAT225 的差异也不显著。表明播种时施 N 113 kg/hm^2 和 N 225 kg/hm^2 一样能很好地满足玉米前期生长发育所需。在施氮总量相同的条件下,分基追两次施肥和播种时一次性基施在 25 d(V3—V4)和追肥后对叶片 Dualex 值无显著影响。叶片 Dualex 值与植株氮含量显著负相关:出苗后 25 d 和 60 d,$P \leqslant 0.01$;出苗后 33 ~ 40 d,$P \leqslant 0.001$(表 1)。

2.3　叶片 P_N 的变化

图 4 表明,出苗后 25 d(V3—V4),N0、N20 + 93 和 N45 + 68 处理间 P_N 差异不显著,但却显著低于 N113 和 SAT225 处理;N113 和 SAT225 处理间 P_N 也差异不显著。出苗后 33 ~ 40 d(V4—V7),各处理间 P_N 均无差异。追肥后,N20 + 93、N45 + 68 和 N113 处理间及与氮饱和处理 SAT225 P_N 差异均不显著,但 N20 + 93 处理的 P_N 略高于 N45 + 68 和 N113。说明基肥量的多少对于出苗后 33 ~ 40 d(V4—V7)这一阶段叶片 P_N 变化并无显著影响。在施氮总量相同条件下,分基追两次施肥和播种时一次性施肥在追肥后对叶片 P_N 无显著影响。叶片 P_N 与植株氮

表 1　SPAD 值、Dualex 值、P_N、LAI、地上部生物量、SPAD × LAI 和 P_N × LAI 与植株氮含量的相关性

Table 1　Correlation between SPAD reading, Dualex reading, P_N, LAI, shoot dry biomass, SPAD × LAI and P_N × LAI, and N concentration of corn

出苗后天数(d) Days after emergence	SPAD reading	Dualex reading	P_N	LAI	地上部生物量 Shoot dry biomass	SPAD × LAI	P_N × LAI
25 (V3—V4)	0.90***	−0.72**	0.40	0.67**	0.69**	0.77***	0.70**
33 (V4—V5)	0.93***	−0.91***	0.53*	0.72***	0.80***	0.83***	0.75***
40 (V6—V7)	0.83***	−0.74***	0.67**	0.64**	0.70***	0.71***	0.74**
60 (VT)	0.80***	−0.58**	0.85***	0.06	0.01	0.29	0.34

注(Note):*、** 和 *** 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上显著 Mean significant at 0.05, 0.01 and 0.001 levels, respectively.

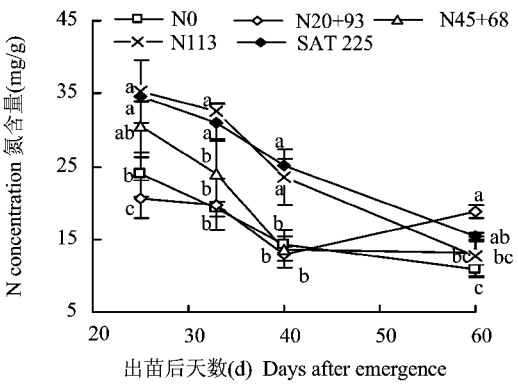

图 2　不同施氮处理对玉米植株氮含量的影响

Fig.2　Effects of N application levels and application times on N concentration of corn

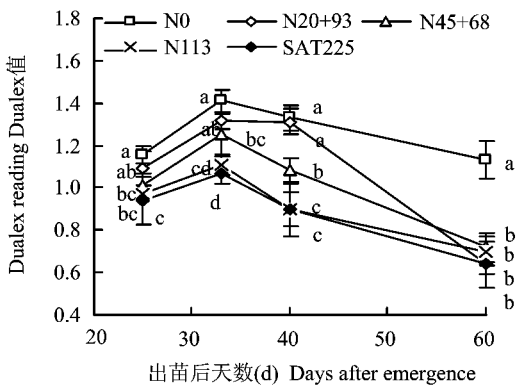

图 3　不同施氮处理对玉米叶片 Dualex 值的影响

Fig.3　Effects of N application levels and application times on Dualex reading of corn leaf

[注(Note):不同字母表示差异达 5% 显著水平($n=4$) Different letters mean significant at 5% level ($n=4$);出苗后 42 d 追肥 Side-dressing N was at 42 days after emergence]

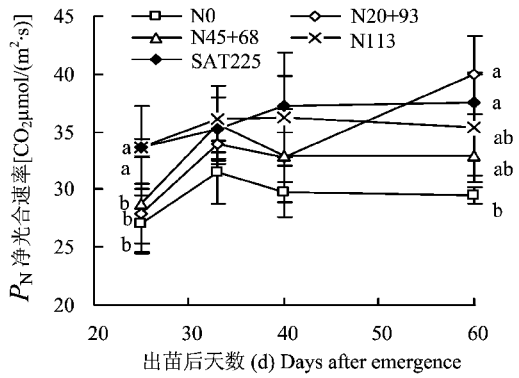

图 4 不同施氮处理对玉米叶片净光合速率的影响

Fig.4 Effects of N application levels and application times on P_N of corn leaf

[注(Note): 不同字母表示差异达 5%显著水平($n=4$) Different letters mean significant at 5% level ($n=4$); 出苗后 42 d 追肥 Side-dressing N was at 42 days after emergence]

含量成显著正相关:出苗后 33 d,$P \leqslant 0.05$; 出苗后 40 d,$P \leqslant 0.01$; 出苗后 60 d,$P \leqslant 0.001$(表 1)。

2.4 LAI、地上部生物量及产量的变化

LAI 随着施氮量的增加而增加(表 2)。出苗后 25 d(V3—V4),N0、N20 + 93、N45 + 68 和 N113 处理间; 出苗后 33 d(V4—V5),N20 + 93、N45 + 68 和 N113 处理间; 出苗后 40 d(V6—V7),N20 + 93 与 N45 + 68,N45 + 68 和 N113 处理间; 追肥后,N20 + 93 与 N45 + 68 处理间 LAI 均无显著差异。N113 的 LAI 显著地高于 N20 + 93 和 N45 + 68。4 期测定中,N113 与 SAT225 处理的 LAI 差异也不显著。

地上部干物重随着施氮量的增加而增加(表 3)。出苗后 25 d(V3—V4),N0 与 N20 + 93 处理间,N20 + 93、N45 + 68、N113 与 SAT225 处理间干物重无差异; 出苗后 33 d(V4—V5), N20 + 93 与 N45 + 68 处理间干物重差异不显著,但其显著低于 N113 和 SAT225 处理。出苗后 40 d(V6—V7),N0 与 N20 + 93 处理间干物重无显著差异,但显著低于 N45 + 68、N113 和 SAT225 处理; N113 与 SAT225 的干物重差异不显著。追肥后,N0 与 N20 + 93 处理间,N20 + 93 与 N45 + 68 处理间干物重差异不显著,但低于 N113 和 SAT225 处理。完熟期,N20 + 93 和 N45 + 68 地上部分生物量虽略高于 N113,但差异不显著,且二者都显著低于氮饱和处理 SAT225。玉米子粒产量也随着施氮量的增加而显著增加,N20 + 93 与 N45 + 68 处理间产量无明显差异,但显著高于 N113(图 5)。在施氮总量相同的条件下,分两次施肥相对于播种时一次性基施,虽然在追肥后 18 d(VT)左右和完熟期并未显著地增加 LAI 和地上部生物量, 却提高了

表 2 不同施氮处理对叶面积指数的影响

Table 2 Effects of N application levels and application times on LAI of corn

处理 Treatment	出苗后天数 Days after emergence (d)			
	25 (V3—V4)	33 (V4—V5)	40 (V6—V7)	60 (VT)
N0	0.17 ± 0.03 b	0.39 ± 0.07 c	0.50 ± 0.15 d	1.80 ± 0.43 c
N20 + 93	0.20 ± 0.01 ab	0.54 ± 0.14 bc	0.78 ± 0.07 cd	2.29 ± 0.33 bc
N45 + 68	0.24 ± 0.05 ab	0.55 ± 0.08 bc	1.05 ± 0.29 bc	2.86 ± 0.33 b
N113	0.28 ± 0.12 ab	0.78 ± 0.20 ab	1.42 ± 0.49 ab	3.75 ± 0.66 a
SAT225	0.31 ± 0.05 a	0.96 ± 0.11 a	1.70 ± 0.44 a	4.35 ± 0.41 a

注(Note): 数值后不同字母表示同一时期不同处理差异达 5%显著水平 Values followed by different letters mean significant among different treatments in a period at 5% level.

表 3 不同施氮处理对地上部干物重的影响(kg/hm²)

Table 3 Effects of N application levels and application times on aboveground dry biomass of corn

处理 Treatment	出苗后天数 Days after emergence (d)				
	25 (V3—V4)	33 (V4—V5)	40 (V6—V7)	60 (VT)	150 (R6, 完熟期 Maturity)
N0	82 ± 4 b	209 ± 39 d	661 ± 47 c	1625 ± 283 c	8520 ± 1044 c
N20 + 93	143 ± 5 ab	388 ± 29 c	967 ± 43 c	2718 ± 645 bc	18281 ± 853 b
N45 + 68	161 ± 31 a	430 ± 11 c	1383 ± 243 b	3652 ± 369 b	18715 ± 584 b
N113	170 ± 63 a	531 ± 53 b	1773 ± 405 a	5444 ± 1292 a	17908 ± 853 b
SAT225	200 ± 46 a	644 ± 29 a	2067 ± 238 a	5885 ± 1673 a	22485 ± 2027 a

注(Note): 数值后不同字母表示同一时期不同处理差异达 5%显著水平 Values followed by different letters mean significant among different treatments in a period at 5% level.

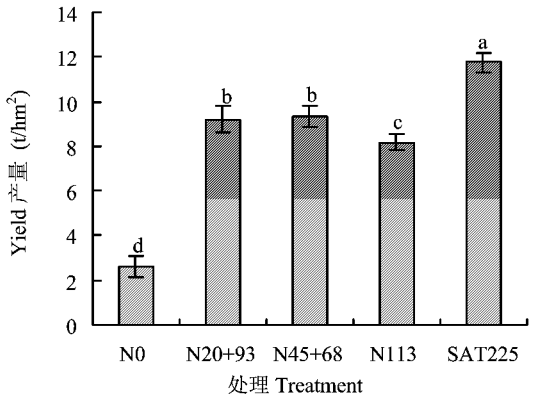

图 5　不同施氮量和施氮时期对玉米产量的影响

Fig.5　Effects of N application levels and application times on corn yield

[注(Note):柱上不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant at 5% level.]

玉米产量。表明相对于播种时一次性施肥,追施氮肥可以尽可能地满足玉米生长后期对氮素的需求,进而提高玉米产量。LAI 和地上部干物重均与植株氮含量在追肥前呈显著正相关(表 1)。

2.5　冠层叶绿素密度和冠层光合特性的变化

SPAD × LAI 和 P_N × LAI 分别反映冠层叶绿素密度和冠层光合能力[27]。SPAD × LAI 和 P_N × LAI 均随着施氮量增加而增加,且随生育期推进而增加(图 6、图 7)。出苗后 25 d(V3—V4),N0、N20 + 93、N45 + 68 和 N113 处理间,及 N45 + 68、N113 与 SAT225 之间 SPAD × LAI 均无显著差异;出苗后 33 d(V4—V5),N0、N20 + 93 和 N45 + 68 处理的 SPAD × LAI 无显著差异,但均低于 N113 与 SAT225 处理。出苗后 40 d(V6—V7),N0 和 N20 + 93 间,N45 + 68、N113 与 SAT225 处理间的 SPAD × LAI 均无显著差异;追肥后,N20 + 93 和 N45 + 68 处理的 SPAD × LAI 显著高于 N0,却低于 N113 与 SAT225 处理。

出苗后 25 d(V3—V4),N0、N20 + 93 和 N113 处理间,N20 + 93、N45 + 68、N113 和 SAT225 处理间 P_N × LAI 均无显著差异;出苗后 33 d(V4—V5),N20 + 93 和 N45 + 68 处理间,N113 和 SAT225 处理间的 P_N × LAI 也无差异,但 N20 + 93 和 N45 + 68 的 P_N × LAI 显著低于 N113 和 SAT225 处理。出苗后 40 d(V6—V7),N0、N20 + 93 和 N45 + 68 处理间,N45 + 68、N113 与 SAT225 处理间的 P_N × LAI 差异均不显著;追肥后,N20 + 93 和 N45 + 68 处理间,N113 与 SAT225 处理间的 P_N × LAI 差异也不显著,但 N20 + 93 和 N45 + 68 处理的 P_N × LAI 显著低于 N113 与 SAT225 处理。说明播种时施 N 113 kg/hm² 和施入饱和的氮肥量对 SPAD × LAI 和 P_N × LAI 无显著的影响。SPAD × LAI 和 P_N × LAI 分别与植株氮含量在追肥前呈显著正相关(表 1)。

2.6　生理特性与玉米产量的相关性

表 4 看出,不同处理出苗后 25 ~ 60 d(V3—VT)叶片 SPAD 值、P_N、LAI 以及地上部分生物量均与产量显著正相关,叶片 Dualex 值与产量显著负相关。冠层叶绿素密度 SPAD × LAI 和冠层光合能力 P_N × LAI 也同样与产量显著正相关,且相关系数在出苗后 33 ~ 60 d 大于单个叶片的叶绿素含量(SPAD 值)和在 25 ~ 60 d 大于单个叶片的光合能力(P_N)。因此,在各测定日期具有较高 SPAD × LAI 和 P_N × LAI

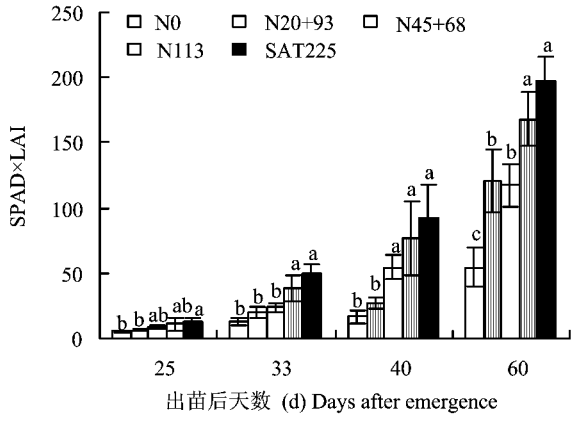

图 6　不同施氮处理对玉米冠层叶绿素密度的影响

Fig.6　Effects of N application levels and application times on SPAD × LAI

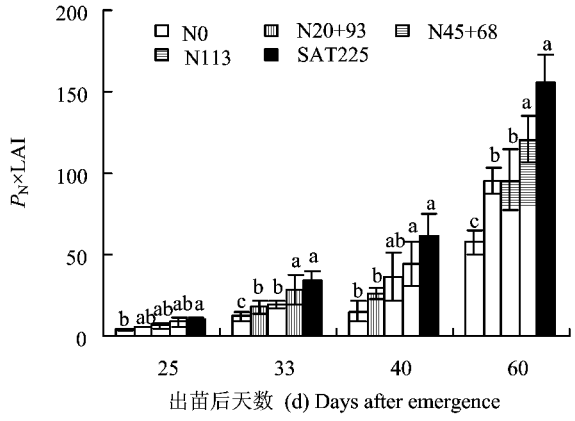

图 7　不同施氮处理对玉米冠层光合能力的影响

Fig.7　Effects of N application levels and application times on P_N × LAI

[注(Note):柱上不同字母表示同一时期不同处理差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant among different treatments in a period at 5% level.]

表 4 SPAD 值、Dualex 值、P_N、LAI、地上部生物量、SPAD × LAI 和 P_N × LAI 与玉米产量的相关性

Table 4 Correlation between SPAD reading, Dualex reading, P_N, LAI, shoot dry biomass, SPAD × LAI and P_N × LAI, and corn grain yield

出苗后天数(d) Days after emergence	SPAD 值 SPAD reading	Dualex 值 Dualex reading	P_N	LAI	地上部生物量 Shoot dry biomass	SPAD × LAI	P_N × LAI
25 (V3—V4)	0.69***	-0.68***	0.36	0.58*	0.72**	0.64*	0.62*
33 (V4—V5)	0.66**	-0.68***	0.42	0.68***	0.81***	0.68**	0.66**
40 (V6—V7)	0.57**	-0.58**	0.49	0.65**	0.68***	0.61**	0.72**
60 (VT)	0.70***	-0.87***	0.60*	0.70*	0.63**	0.77***	0.80***

注(Note): *、** 和 *** 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上差异显著 Mean significant at 0.05, 0.01 and 0.001 levels, respectively.

的氮饱和处理 SAT225 的产量显著高于其他处理,具有较低 SPAD × LAI 和 P_N × LAI 的 N0 处理的产量显著低于其他处理。

3 讨论与结论

本试验结果表明,在一定量基施氮肥(N 20 或 45 kg/hm^2)的基础上,拔节期再追施部分氮肥(N 93 或 68 kg/hm^2)可显著提高玉米产量,这与 Arora 等[6]的研究结果一致。这是因为拔节期前玉米对氮素的需求量比较低,而进入拔节期,玉米对氮素的需求增加,此时追肥可以使氮肥最大限度地被玉米利用,减少氮肥的损失[28]。基肥配合追肥处理的 LAI 和地上部生物量在追肥后 18 d(VT)左右均显著低于氮肥一次性基施,但显著提高玉米产量。这是由于追肥后 18 d(VT)左右玉米植株的生长还没有达到和氮肥一次性基施的效果,因此 LAI 和地上部生物量较低。在玉米生长后期追肥能满足后期玉米生长的营养需求,使产量提高。

N20 + 93 与 N45 + 68 两处理成熟期地上部分生物量和产量均无差异,但 N 20 + 93 处理叶片 SPAD 值出苗后 25 d(V3—V4)和 40 d(V6—V7)显著低于 N45 + 68 处理,其叶片 Dualex 值出苗后 40 d(V6—V7)显著高于 N45 + 68 处理。追肥前,N0 和 N20 + 93 处理之间的 SPAD 值、Dualex 值和 LAI 差异均不显著,且 N20 + 93 的 LAI 和地上部生物量始终低于 N45 + 68 处理,表明 N 20 kg/hm^2 的基肥量不能很好地满足玉米前期生长发育所需。因此,在追肥时间和总施肥量相同的前提下,N 45 kg/hm^2 的基肥量比较合理。同等施氮量条件下,基追肥配合虽然显著提高了玉米产量,但是产量仍然低于氮饱和处理(SAT225),这是因为总施氮量为 113 kg/hm^2 时,并不能满足玉米后期生长的营养需求。因此,为了实现理想的经济产量,应增加追肥量。周顺利等[29]研究发现,总施氮量低于 N 112.5 kg/hm^2 时易发生氮素亏缺。综合考虑经济效应和环境效应,范亚宁等[30]认为,适宜的施氮量为 N 135 kg/hm^2。相对于施 N 120 kg/hm^2,施 N 200 kg/hm^2 显著增加玉米产量,但土壤中残留的硝态氮也增加[31]。在加拿大魁北克地区玉米上的推荐施氮量为 N 110—170 kg/hm^2,至于在本试验基肥量为 N 45 kg/hm^2 的条件下,追肥量多少才更为合理需要进一步研究。

SPAD 值、Dualex 值、LAI、地上部生物量、冠层叶绿素密度(SPAD × LAI)和冠层光合能力(P_N × LAI)均与产量显著相关;且 SPAD × LAI 和 P_N × LAI 的相关系数大于单个叶片的叶绿素含量(SPAD 值)和光合能力(P_N)。说明 SPAD 值、Dualex 值、LAI、地上部生物量、SPAD × LAI 和 P_N × LAI 均可用来评估玉米生长状况,并用于指导施肥。但 LAI 和地上部生物量的测定过程比较复杂,实际操作时间长,而且破坏植株的生长。使用无损测试技术对土壤或作物氮素状况的精确评价是作物营养诊断技术的发展趋势[32]。SPAD 值和 Dualex 值均与植株氮含量显著相关,它们作为实时快速诊断作物氮素营养的指标已经得到了认可[17-20, 22, 25],可用作指导玉米追肥的实时快速诊断工具。

参 考 文 献:

[1] Elia A, Santamaria P, Serio F. Nitrogen nutrition, yield and quality of spinach [J]. J. Sci. Food Agric., 1998, 76: 341-346.

[2] Ferguson R B, Hergert G W, Schepers J S *et al*. Site-specific nitrogen management of irrigated maize: Yield and soil residual nitrate effects [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2002, 66: 544-553.

[3] Samonte S O P B, Wilson L T, Medley J C *et al*. Nitrogen utilization efficiency: Relationships with grain yield, grain protein, and yield-related traits in rice [J]. Agron. J., 2006, 98: 168-176.

[4] Matson P A, Naylor R, Monasterio I O. Integration of environmental, agronomic, and economic aspects of fertilizer management [J]. Sci., 1998, 280: 112-115.

[5] Vyn T J, Janovicek K J, Miller M H *et al*. Soil nitrate and crop response to preceding small grain fertilization and cover crops [J].

Agron. J., 1999, 91: 17-24.

[6] Arora Y, Juo A S R. Leaching of fertilizer ions in a Kaolinitic Ultisol in the high rainfall tropics: Leaching of nitrate in field plots under cropping and bare fallow [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1982, 46: 1212-1218.

[7] Randall G W, Vetsch J A, Huffman J R. Corn production on a subsurface-drained mollisol as affected by time of nitrogen application and nitrapyrin [J]. Agron. J., 2003, 95: 1213-1219.

[8] Fox R H, Kern J M, Piekielek W P. Nitrogen fertilizer source, and method and time of application effects on no-till corn yields and nitrogen uptake [J]. Agron. J., 1986, 78: 741-746.

[9] Russelle M P, Delbert E J, Hauck R D *et al*. Effects of water and nitrogen management on yield and ^{15}N-depleted fertilizer use efficiency of irrigated corn [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1981, 45: 553-558.

[10] Randall G W, Iragavarapu T K, Bock B R. Nitrogen application methods and timing for corn after soybean in a ridgetillage system [J]. J. Prod. Agric., 1997, 10: 300-307.

[11] Scharf P C, Wiebold W J, Lory J A. Corn yield response to nitrogen fertilizer timing and deficiency level [J]. Agron. J., 2002, 94: 435-441.

[12] Sripada R P, Heiniger R W, White J G, Weisz R. Aerial color infrared photography for determining late-season nitrogen requirements in corn [J]. Agron. J., 2005, 97: 1443-1451.

[13] Evans J R. Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat [J]. Plant Physiol., 1983, 72 (2): 297-302.

[14] 沈秀瑛, 戴俊英,胡安畅,等. 玉米群体冠层特征与光截获量及产量关系的研究[J]. 作物学报,1993,19 (3) : 246-252.
Shen X Y, Dai J Y, Hu A C *et al*. Studies on relationship among character of canopy light interception and yield in maize populations (*Zea mays* L.) [J]. Acta Agron. Sin., 1993, 19(3): 246-252.

[15] 孙年喜,宗学凤,王三根.不同供氮水平对玉米光合特性的影响[J] .西南农业大学学报(自然科学版),2005,27 (3): 389-392.
Sun N X, Zong X F, Wang S G. Effects of nitrogen supply on photosynthetic traits of maize [J]. J. Southwest Agric. Univ. (Nat. Sci.), 2005, 27(3): 389-392.

[16] 黄高宝,张恩和,胡恒觉. 不同玉米品种氮素营养效率差异的生态生理机制[J]. 植物营养与肥料学报,2001,7 (3): 293-297.
Huang G B, Zhang E H, Hu H J. Eco-physiological mechanism on nitrogen use efficiency difference of corn varieties [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2001, 7(3): 293-297.

[17] Arregui L M, Lasa B, Lafarga A *et al*. Evaluation of chlorophyll meters as tools for N fertilization in winter wheat under humid Mediterranean conditions [J]. Eur. J. Agron., 2006, 24: 140-148.

[18] Hussain F, Bronson K F, Yadvinder S *et al*. Use of chlorophyll meter sufficiency indices for nitrogen management of irrigated rice in Asia [J]. Agron. J., 2000, 92: 875-879.

[19] Varvel G E, Schepers J S, Francis D D. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1997, 6: 1233-1239.

[20] Wood C W, Reeves D W, Duffield R R, Edmisten K L. Field chlorophyll measurements for evaluation of corn nitrogen status [J]. J. Plant Nutr., 1992, 15: 487-500.

[21] Cartelat A, Cerovic Z G, Goulas Y *et al*. Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Field Crop. Res., 2005, 91: 35-49.

[22] Goulas Y, Cerovic Z G, Cartelat A *et al*. Dualex: A new instrument for field measurements of epidermal UV - absorbance by chlorophyll fluorescence [J]. Appl. Optics, 2004, 43: 4488-4496.

[23] Hinzman L D, Bauer M E, Daughtry C S T. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat [J]. Rem. Sens. Environ., 1986, 19: 47-61.

[24] Ritchie S W, Hanway J J, Benson G O. How a corn plant develops [R]. Special Report (No. 48). Ames, IA, USA: Iowa State University of Science and Technology Cooperative Extension Service. 1993.

[25] Tremblay N, Wang Z J, Bélec C. Evaluation of the Dualex for the assessment of corn nitrogen status [J]. J. Plant Nutr., 2007, 30: 1355-1369.

[26] Lachat Instruments. Methods list for automated ion analyzers (flow injection analyses, ion chromatography)[EB/OL]. 2005. Available at www. lachatinstruments. com/applications/MethodsList. PDF (accessed 17 Dec. 2007). Lachat Instruments, Loveland, CO.

[27] Jiang D, Dai T, Jing Q *et al*. Effects of long-term fertilization on leaf photosynthetic characteristics and grain yield in winter wheat [J]. Photosynth., 2004, 42(3): 439-446.

[28] Ma B L, Dwyer L M, Gregorich E G. Soil N amendment, effects on seasonal N mineralization and N cycling in maize production [J]. Agron. J., 1999, 91: 1003-1009.

[29] 周顺利,张福锁,王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏Ⅱ.夏玉米[J]. 生态学报,2002,22 (1) : 49-53.
Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. The spatio-temporal variations of soil NO_3^--N and apparent budget of soil nitrogen II. Summer maize [J]. Acta Ecol. Sin., 2002, 22(1): 49-53.

[30] 范亚宁,李世清,李生秀. 半湿润地区农田夏玉米氮肥利用率及土壤硝态氮动态变化[J]. 应用生态学报,2008,19 (4): 799-806.
Fan Y N, Li S Q, Li S X. Utilization rate of fertilizer N and dynamic changes of soil NO_3^--N in summer maize field in semi-humid area of Northwest China [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2008, 19(4): 799-806.

[31] Elmi A A, Madramootoo C, Egeh M *et al*. Environmental and agronomic implications of water table and nitrogen fertilization management [J]. J. Environ. Qual., 2002, 31: 1858-1867.

[32] 贾良良,陈新平,张福锁. 作物氮素营养诊断的无损测试技术[J]. 世界农业,2001, (6): 36-37.
Jia L L, Chen X P, Zhang F S. Non-destructive measurement of crop nitrogen nutrition diagnosis [J]. World Agric., 2001, (6): 36-37.