

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2010.00840

利用 SPAD 和 Dualex 快速、无损诊断玉米氮素营养状况

鱼欢^{1,2} 邬华松^{1,3} 王之杰²

¹中国热带农业科学院香料饮料研究所, 海南万宁 571533; ²加拿大农业与农业食品部园艺研究与发展中心, St-Jean-sur-Richelieu, Canada, J3B3E6; ³中国热带农业科学院国家重要热带作物工程技术研究中心, 海南儋州 571737

摘要: 为了探讨玉米生长过程中适宜的施氮量, 以加拿大玉米品种 Pioneer 38B84 为试验材料, 在底施氮为 45 kg hm⁻² 和基本苗 7.9 万株 hm⁻² 条件下, 研究追氮量 0、34、68、101、135、169 和 203 kg hm⁻² 以及氮饱和参考小区等 8 个处理对吐丝后玉米穗位叶 SPAD 值、Dualex 值、地上部生物量及产量的影响。结果表明, SPAD 值、地上部生物量以及产量均随追氮量增加而增加, Dualex 值随追氮量增加而降低。追氮 101、135、169 和 203 kg hm⁻² 处理的 SPAD-氮饱和指数 (SPAD-NSI) 在各测定日期均大于 0.95。追氮 101 kg hm⁻² 处理的 Dualex-NSI 在吐丝后 18–46 d 大于 0.95; 追氮 135、169 和 203 kg hm⁻² 各处理的 Dualex-NSI 在各测定日期均大于 0.95。SPAD 值、Dualex 值、SPAD-NSI 和 Dualex-NSI 均与追氮量显著相关。在拔节期追氮 101 kg hm⁻² 或 135 kg hm⁻² 即可满足玉米生长对氮素的需求, 获得最大的经济产量。当超过最大产量施肥量时, 氮肥用量的增加对 SPAD 值、Dualex 值、地上部生物量以及产量均无显著影响。追肥不仅可达到与氮饱和参考小区同样的产量效果, 而且还可减少氮肥的施用量, 减少种植者的经济投入。在本试验条件下, 基施氮 45 kg hm⁻², 在拔节期适宜的追氮量为 101 kg hm⁻² 或 135 kg hm⁻²。SPAD 叶绿素仪与 Dualex 仪均可用来诊断玉米的氮素营养状况。

关键词: 追施氮肥量; 玉米; SPAD 值; Dualex 值; 产量

Evaluation of SPAD and Dualex for In-Season Corn Nitrogen Status Estimation

YU Huan^{1,2}, WU Hua-Song^{1,3}, and WANG Zhi-Jie²

¹Spice and Beverage Crops Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Wanning 571533, China; ²Horticulture Research and Development Centre, Agriculture and Agri-Food Canada, St-Jean-sur-Richelieu, J3B3E6, Quebec, Canada; ³National Centre of Important Tropical Crops Engineering and Technology Research, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Danzhou 571737, China

Abstract: Nitrogen (N) is one of the most important nutrients influencing both yield and grain quality, and N supply is one of the few production factors that can be controlled and which is known to effectively influence crop performance. Both SPAD reading and Dualex reading are shown to be highly correlated with leaf N concentration, and crop N status can be assessed through the SPAD reading and Dualex reading. The purpose of this study was to evaluate the suitable N rate at topdressing time. In order to evaluate the N application rates on SPAD reading and Dualex reading of corn after silking, corn field experiment was conducted with application of 45 kg N ha⁻¹ at sowing and planting density of 79 000 plants ha⁻¹ in 2008 on the L'Acadie experimental farm (Quebec, Canada). Topdressing N was performed with 0, 34, 68, 101, 135, 169, and 203 kg N ha⁻¹ at jointing stage. N-saturated reference plots with topdressing of 180 kg N ha⁻¹ at 10 days after sowing, besides 45 kg N ha⁻¹ at sowing, was established. With increasing topdressing N rates, SPAD reading, aboveground dry biomass and corn grain yield increased, and Dualex reading decreased. The SPAD-NSI of topdressing N treatments with 101, 135, 169, and 203 kg N ha⁻¹ was always higher than 0.95 at all samplings dates. The Dualex-NSI of topdressing N treatments with 101 kg N ha⁻¹ was higher than 0.95 from 18 d to 46 d; the Dualex-NSI of topdressing N treatments with 135, 169, and 203 kg N ha⁻¹ was also higher than 0.95 at all samplings dates. SPAD reading, Dualex reading, SPAD-NSI and Dualex-NSI were strongly correlated with topdressing N rates. The maximum yield was reached when topdressing N was 101 or 135 kg N ha⁻¹ at jointing stage. When maximum yield was reached, any additional N was no significant effect on SPAD reading, Dualex reading, aboveground dry biomass and corn grain yield. Topdressing N rate of 101 or 135 kg N ha⁻¹ was enough for corn growth after silking and getting maximum grain yield. There was no significant difference between splitting the N into two applications and N-saturated application on grain yield; however, splitting the N into two applica-

本研究由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) 和国家科技支撑计划项目 (2007BAD48B06-7) 资助。

第一作者联系方式: E-mail: yhdwm2000@yahoo.com.cn

Received (收稿日期): 2009-10-20; Accepted (接受日期): 2010-02-06.

tions significantly decreased the total N application rate and growers' inputs. In the present study, the suitable topdressing N rate was 101 or 135 kg N ha⁻¹ with 45 kg N ha⁻¹ at sowing. SPAD and Dualex could be integrated to evaluate in-season N status of corn.

Keywords: Topdressing N application rates; Corn; SPAD reading; Dualex reading; Corn grain yield

氮素供应是影响作物生长的重要因素之一^[1-3], 然而, 目前氮素在作物上的利用率(NUE)很低。根据玉米生长过程中对氮素的吸肥规律来施氮肥, 可以提高 NUE、降低 NO₃-N 的淋失、减少对地表水和地下水的污染^[3]。前人研究表明, 追肥可以显著提高玉米的产量和 NUE、降低 NO₃-N 的淋失^[4-5], 而且应该在玉米需要氮素的时期追施氮肥, 比如在玉米出苗几周之后追肥^[6-8]。为了及时掌握作物生长情况, 往往以地上部的氮素状况作为诊断作物氮素营养的依据。但传统的方法不仅破坏植株的生长, 同时操作复杂、实验室分析周期长, 难以实现作物生长期间的实时监测。因此, 探索使用简便、实时快速、无损的作物氮素形态诊断方法尤为重要。

SPAD 叶绿素仪作为一种快速测定作物叶绿素水平及快速诊断作物氮素水平的工具, 得到很多专家的认可和推广, 并在小麦、水稻、玉米等作物氮素营养诊断中得到应用^[9-12]。然而, SPAD 值会受年份、地点、品种、土壤性状、作物生长季节及生长环境的影响^[13-14]。因此, 有些研究者推荐在田间设一块供氮量对于作物来讲处于奢侈或饱和和吸收状态的参考小区来消除这些因素对 SPAD 值的影响, 这个参考小区被称为氮饱和参考小区^[12,14-15]。氮饱和参考小区是诊断作物氮素水平以及确定追肥量最有效的参照方法, 可使所有妨碍氮素诊断的因素都被消除^[16]。它适用于不同的季节、土壤类型和作物品种^[14]。在使用 SPAD 叶绿素仪评估作物氮素状况时设氮饱和参考小区可以减少作物上氮素的施用量而且对产量无影响^[14,17]。Varvel 等^[12]指出所需评估氮素水平小区的 SPAD 值与氮饱和参考小区的 SPAD 值的比值被定义为氮饱和指数(NSI)。研究表明, NSI 0.95(或 95%)是评估作物氮素水平的一个临界值, 当 NSI 小于 0.95 时, 作物缺氮, 需要追施氮肥, 否则导致玉米减产^[12,15]。

多酚是植物次生代谢的产物, 多酚化合物在 UV-A 和 UV-B 紫外线波段具有典型的吸收峰^[18], 该特性可以防止有害的紫外线辐射^[19]。叶片表层吸光率与植物叶片的多酚浓度有直接关系, 因此可以通过测定叶片紫外吸收性能来评估叶片多酚含量^[20]。多酚约占叶片干重的 23%, 且与叶片氮含量显著负

相关, 当氮素缺乏时可引起叶片多酚含量的增加^[20]。因此, 作物氮素水平也可以通过叶片的多酚含量来诊断。Dualex 是一种新型便携式叶片测定仪器, 以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^[21]。该仪器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, 可实现田间的快速测定, 还具有实时、简便、不破坏植株生长等优点。

SPAD 值和 Dualex 值均与叶片氮含量显著相关^[20,22]。应用 SPAD 叶绿素仪对玉米、水稻等作物进行氮素亏缺及需氮量预测和作物生长评价等方面已有不少研究成果^[9-12], 但是关于使用 Dualex 仪以及 Dualex-氮饱和指数(Dualex-NSI)评估玉米需氮量的研究很少。本研究拟通过不同追氮量对吐丝后玉米穗位叶 SPAD 值、Dualex 值以及生物量和产量的影响, 探索适宜的追肥量, 以期能为氮肥在玉米上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 5~10 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 (45°17' N; 73°20' W)进行, 该站位于加拿大东南部, 海拔 47 m, 年平均降水量 1 000 mm。0~30 cm 土层含有机质 37 g kg⁻¹、硝态氮 2 mg kg⁻¹、有效磷 71 mg kg⁻¹ (Mehlich 3 法)、有效钾 121 mg kg⁻¹ (Mehlich 3 法), pH 7.3, 试验地土壤为壤土。在加拿大魁北克省地区大田作物每年 5~10 月种植一季。采用完全随机区组设计, 基施氮肥 45 kg hm⁻², 拔节期(播种后 53 d)追施氮量分别为 0、34、68、101、135、169、203 kg hm⁻², 氮饱和参考小区(SAT225)除基施氮 45 kg hm⁻²外播种后 10 d 沟施氮肥 180 kg hm⁻²(表 1)。在加拿大魁北克省玉米上的推荐施氮量为 110~170 kg hm⁻², 本试验中氮饱和参考小区中氮肥量为 225 kg hm⁻², 因此可以保证整个生育期内不缺氮。氮肥为液态硝酸铵尿素(urea ammonium nitrate, 32% N)。磷、钾肥根据 0~30 cm 土层测定结果分别施重过磷酸钙(46% P₂O₅) 109 kg hm⁻²、氯化钾(60% K₂O) 63 kg hm⁻²和硫酸钾

表1 不同处理氮肥施用时期及施用量
Table 1 The N application times and N rates on corn (kg N hm⁻²)

处理 Treatment	播种时施氮量 N at sowing	播种后 10 d 沟施氮肥量 Banded N at 10 days after sowing	追氮量 Topdressing N	施氮总量 Total N
N45	45	0	0	45
N45+34	45	0	34	79
N45+68	45	0	68	113
N45+101	45	0	101	146
N45+135	45	0	135	180
N45+169	45	0	169	214
N45+203	45	0	203	248
SAT 225	45	180	0	225

镁肥(22% K₂O) 170 kg hm⁻²。小区面积 16 m×3 m = 48 m², 重复 4 次。供试品种为加拿大玉米(*Zea mays* L.)推广品种 Pioneer 38B84, 于 2008 年 5 月 12 日播种。每小区 4 行, 行距 75 cm, 基本苗为 7.9 万株 hm⁻², 整个生育期内不灌溉。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 SPAD 值 于吐丝后第 11 天上午 8:30~11:00, 每小区选择生长均匀一致的玉米, 用 SPAD 分析仪(SPAD-502, 日本产)测定每小区中间两行玉米穗位叶长度的 1/2 处上表面, 避开叶脉位置。每小区测定 20 次, 取平均值。之后每隔 6~8 d 测定一次。

1.2.2 Dualex 值 测定 SPAD 后的当天, 在测定 SPAD 的叶片及部位用 Dualex 仪器(Dualex3.3, 法国产)测定 Dualex 值, 每小区测定 20 次, 取平均值。因为叶片上、下表面的 Dualex 值显著相关, 在农业生产中可以只测定叶片的一面^[20,22], 在本试验中只测定了穗位叶上表面的 Dualex 值。

1.2.3 生物量、籽粒重量及产量 收获前每小区选取 6 株地上部分, 于通风烘箱内 70℃烘 7 d 至衡重, 测定地上部分干物质重和籽粒干重。收获期使用联合收割机分别收获每小区中间两行玉米、收获长度 9.5 m 来计算产量。

1.3 数据分析

SPAD-氮饱和指数(SPAD-NSI)为各追肥处理的 SPAD 值与氮饱和参考小区 SAT 225 的 SPAD 值的比值。由于 Dualex 值与作物氮素水平负相关, 所以 Dualex-NSI 为氮饱和参考小区 SAT 225 的 Dualex 值与追肥处理的 Dualex 值的比值。采用 Microsoft Excel 和 SAS 软件 PROC MIXED 程序统计分析数据, Excel 软件作图。

2 结果与分析

2.1 追氮量对玉米叶片 SPAD 值的影响

图 1 表明, 追肥后, 不同施氮量和生育期显著影响 SPAD 值($P < 0.001$), 且施氮量和生育期的互作差异显著($P < 0.01$)。不同处理间穗位叶 SPAD 值随着生育期的推进存在着差异。N45 和 N45+34 处理 SPAD 值随着生育期的推进逐渐下降且显著低于 N45+101、N45+135、N45+169、N45+203 以及氮饱和和处理 SAT 225。N45+68、N45+101、N45+135、N45+169、N45+203 以及氮饱和和处理 SAT 225 随着生育期的推进 SPAD 值呈先上升后下降的趋势。SPAD 值随着施氮量的增加而增加, 但是在吐丝后 11~40 d, N45+68、N45+101、N45+135、N45+169、N45+203 各处理之间 SPAD 值差异不显著, 在吐丝后 46 d, N45+101、N45+135、N45+169 和 N45+203 各处理之间 SPAD 值差异同样不显著, 说明过量追氮对穗位叶 SPAD 值无显著的影响。同时, N45+68、N45+101、N45+135、N45+169、N45+203 各处理与氮饱和和处理 SAT 225 的 SPAD 值在吐丝后 11~46 d 差异均不显著。

2.2 追氮量对玉米叶片 SPAD-NSI 值的影响

追肥后, 不同施氮量显著影响 SPAD-NSI 值($P < 0.001$), 生育期对 SPAD-NSI 值影响不显著, 且施氮量和生育期的互作差异显著($P < 0.05$)。穗位叶 SPAD-NSI 同样随着施氮量的增加而增加, 但是 N45+101、N45+135、N45+169 和 N45+203 各处理之间 SPAD-NSI 值差异不显著。N45 和 N45+34 处理在吐丝后 11~46 d 及 N45+68 处理在吐丝后 18~46 d SPAD-NSI 值均小于 0.95; N45+101、N45+135、N45+169、N45+203 各处理在吐丝后 11~46 d

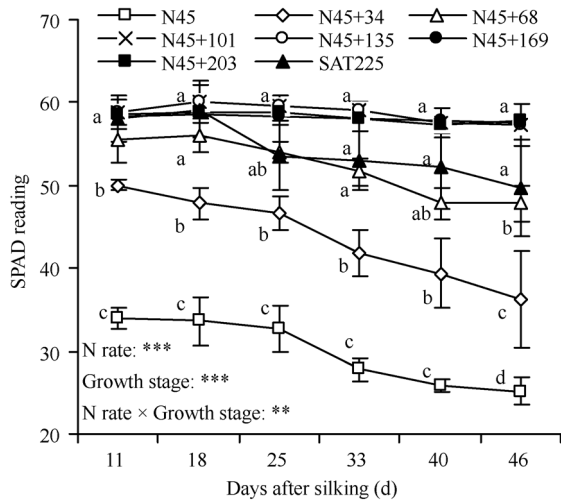


图 1 不同追氮量对玉米叶片 SPAD 值的影响

Fig. 1 Influence of topdressing N rates on SPAD reading of corn ear leaf after silking

不同字母表示不同处理间在同一天内差异达 0.05 显著水平(数据为平均值±标准差, n=4)。符号**和***分别表示在 0.01 和 0.001 水平上差异显著。

Different letters indicate significant difference in the same day after silking at 0.05 probability level (data were mean±SD, n=4). ** and *** indicate significant differences at 0.01 and 0.001 probability levels, respectively.

SPAD-NSI 值均大于 0.95 (表 2)。说明追肥后, N45、N45+34 和 N45+68 处理在一定程度上表现出缺氮, N45+101、N45+135、N45+169、N45+203 各处理在吐丝后均未表现出缺氮。同时 N45+101、N45+135、N45+169 和 N45+203 各处理的 SPAD-NSI 值不仅大于 0.95, 而且大于 1.00, 表明追肥后, 即使整个生育

期内没有达到氮饱和处理 SAT 225 的施氮量, 但是 N45+101、N45+135、N45+169 各处理的 SPAD 值还是相同于, 甚至高于氮饱和处理 SAT 225。

2.3 追氮量对玉米叶片 Dualex 值的影响

表 3 显示, 追肥后, 不同施氮量和生育期均显著地影响 Dualex 值(P 0.001), 且施氮量和生育期的交互差异极显著(P 0.001)。Dualex 值随着生育期的推进逐渐增加, 且随着施氮量的增加而降低。但 SAT 225 的 Dualex 值在各测定日期略高于 N45+169 和 N45+203 处理。N45 和 N45+34 处理的 Dualex 值显著高于其他处理。N45+68 处理与 N45+101 处理的 Dualex 值在吐丝后 11~33 d 差异均不显著, 且与 N45+135 处理的 Dualex 值在 18~33 d 差异也不显著。在吐丝后 11 d, N45+135、N45+169 和 N45+203 处理间无显著差异。在吐丝后 18 d, N45+101、N45+135、N45+169 和 N45+203 处理间无显著差异。在吐丝后 25 d, N45+135 和 N45+169 之间差异不显著, N45+169 和 N45+203 处理间无显著差异。在吐丝后 33 d, N45+101、N45+135、N45+169 和 N45+203 处理之间无显著差异。在吐丝后 40 d 和 46 d, N45+135、N45+169 和 N45+203 处理之间均无显著差异。说明追肥时施入过多的氮素对穗位叶 Dualex 值无显著的影响。同时, N45+135、N45+169、N45+203 各处理的 Dualex 值与氮饱和处理 SAT 225 在吐丝后 18~46 d 差异均不显著, 且在吐丝后 11 d 显著低于 SAT 225。

表 2 不同追氮量对玉米叶片 SPAD-NSI 值的影响

Table 2 Influence of topdressing N rates on SPAD-NSI of corn ear leaf after silking

处理 Treatment	吐丝后天数 Days after silking					
	11 d	18 d	25 d	33 d	40 d	46 d
N45	0.60±0.08 c	0.59±0.06 d	0.62±0.09 d	0.53±0.10 c	0.50±0.12 d	0.52±0.10 d
N45+34	0.86±0.08 b	0.82±0.06 c	0.87±0.09 c	0.81±0.09 b	0.76±0.18 c	0.75±0.21 c
N45+68	0.96±0.07 a	0.94±0.08 b	0.94±0.15 b	0.93±0.23 a	0.92±0.05 b	0.92±0.13 b
N45+101	0.98±0.04 a	0.97±0.08 ab	1.08±0.16 ab	1.09±0.24 a	1.06±0.10 ab	1.12±0.22 ab
N45+135	1.02±0.04 a	1.02±0.10 a	1.13±0.17 a	1.14±0.20 a	1.10±0.18 a	1.19±0.26 a
N45+169	1.02±0.07 a	1.00±0.09 ab	1.10±0.17 ab	1.12±0.22 a	1.11±0.22 a	1.20±0.28 a
N45+203	1.02±0.08 a	1.00±0.10 ab	1.11±0.13 a	1.12±0.19 a	1.09±0.14 a	1.20±0.26 a
施氮量 N rate			***			
生育期 Growth stage			NS			
施氮量×生育期 N rate × Growth stage			*			

同一列内标以不同字母的值在 0.05 水平上差异显著(数据为平均值±标准差, n=4)。*和***分别表示在 0.05 和 0.001 水平上差异显著。NS 表示无显著差异。

Values within the same column followed by a different letter indicate significant difference at 0.05 probability level (data are mean±SD, n=4). * and *** indicate significant difference at 0.05 and 0.001 probability levels, respectively, and NS means no significant difference.

表 3 不同追氮量对玉米叶片 Dualex 值的影响
Table 3 Influence of top-dressing N rates on Dualex reading of corn ear leaf after silking

处理 Treatment	吐丝后天数 Days after silking					
	11 d	18 d	25 d	33 d	40 d	46 d
N45	1.10±0.07 a	1.13±0.14 a	1.25±0.06 a	1.25±0.10 a	1.31±0.05 a	1.31±0.09 a
N45+34	0.96±0.07 b	1.12±0.07 a	1.14±0.11 b	1.18±0.18 a	1.27±0.11 a	1.30±0.12 a
N45+68	0.87±0.06 c	0.93±0.07 b	0.96±0.07 c	1.03±0.16 b	1.13±0.08 b	1.16±0.10 b
N45+101	0.83±0.03 cd	0.86±0.03 bc	0.95±0.09 c	0.96±0.13 bc	1.00±0.05 c	1.06±0.07 c
N45+135	0.74±0.09 e	0.87±0.08 bc	0.90±0.06 cd	0.94±0.04 bc	0.93±0.10 d	0.95±0.12 d
N45+169	0.75±0.07 e	0.80±0.05 c	0.84±0.10 de	0.89±0.09 bc	0.91±0.06 d	0.94±0.05 d
N45+203	0.74±0.07 e	0.78±0.06 c	0.82±0.09 e	0.85±0.04 c	0.87±0.09 d	0.89±0.06 d
SAT 225	0.81±0.05 d	0.85±0.05 bc	0.88±0.12 de	0.92±0.11 bc	0.92±0.06 d	0.95±0.08 d
施氮量 N rate				***		
生育期 Growth stage				***		
施氮量×生育期 N rate × Growth stage				***		

同一列内标以不同字母的值在 0.05 水平上差异显著(数据为平均值±标准差, $n=4$)。*** 表示在 0.001 水平上差异显著。

Values within the same column followed by a different letter indicate significant difference at 0.05 probability level (data are mean±SD, $n=4$). *** indicates significant difference at 0.001 probability level.

2.4 追氮量对玉米叶片 Dualex-NSI 值的影响

追施氮肥后, 不同施氮量和生育期均显著影响 Dualex-NSI 值($P < 0.001$), 但施氮量和生育期的交互差异不显著(表 4)。Dualex-NSI 随着施氮量的增加而增加。但在吐丝后 11、40 和 46 d, N45+135、N45+169 和 N45+203 处理之间均无显著差异; N45+169 和 N45+203 处理之间在吐丝后 18 d 和 25 d 差异均不显著; 在吐丝后 33 d, N45+101、N45+135、N45+169 和 N45+203 处理之间未表现出显著差异。

N45、N45+34 和 N45+68 各处理的 Dualex-NSI 值在吐丝后 11~46 d 均小于 0.95; N45+101 处理的 Dualex-NSI 值在吐丝后 11、18 和 33 d 均大于 0.95; N45+135、N45+169 和 N45+203 各处理 Dualex-NSI 值在吐丝后 11~46 d 均大于 0.95 (表 4)。可见追肥后, N45、N45+34 和 N45+68 各处理的追肥量并不能满足玉米对氮素的需求, 在一定程度上表现出缺氮; N45+135、N45+169 和 N45+203 各处理的追氮量可以满足玉米对氮素的需求, 均未表现出缺氮。N45+

表 4 不同追氮量对玉米叶片 Dualex-NSI 值的影响
Table 4 Influence of top-dressing N rates on Dualex-NSI of corn ear leaf after silking

处理 Treatment	吐丝后天数 Days after silking					
	11 d	18 d	25 d	33 d	40 d	46 d
N45	0.74±0.01 d	0.76±0.05 d	0.70±0.06 e	0.73±0.03 d	0.70±0.02 d	0.72±0.01 d
N45+34	0.84±0.01 c	0.76±0.02 d	0.77±0.03 d	0.78±0.03 cd	0.73±0.02 d	0.73±0.01 d
N45+68	0.93±0.01 b	0.91±0.02 c	0.91±0.06 c	0.90±0.03 bc	0.81±0.04 c	0.82±0.00 c
N45+101	0.98±0.03 b	0.99±0.02 b	0.92±0.04 bc	0.96±0.01 ab	0.92±0.01 b	0.90±0.02 b
N45+135	1.10±0.07 a	0.98±0.03 bc	0.98±0.07 b	0.98±0.08 ab	0.99±0.04 a	1.00±0.04 a
N45+169	1.08±0.03 a	1.06±0.04 a	1.05±0.02 a	1.03±0.02 a	1.01±0.00 a	1.01±0.03 a
N45+203	1.10±0.06 a	1.10±0.03 a	1.07±0.04 a	1.08±0.08 a	1.06±0.06 a	1.06±0.01 a
施氮量 N rate				***		
生育期 Growth stage				***		
施氮量×生育期 N rate × Growth stage				NS		

同一列内标以不同字母的值在 0.05 水平上差异显著(数据为平均值±标准差, $n=4$)。***表示在 0.001 水平上差异显著。NS 表示无显著差异。

Values within the same column followed by a different letter indicate significant difference at 0.05 probability level (data were mean±SD, $n=4$). *** indicates significant difference at 0.001 probability level, and NS means no significant difference.

135、N45+169、N45+203 各处理的 Dualex-NSI 值不仅大于 0.95, 而且接近或大于 1.00, 表明追肥后, 即使整个生育期内没有达到氮饱和处理 SAT 225 的施氮量, 但是 N45+135 和 N45+169 处理还是达到甚至低于氮饱和处理 SAT 225 的 Dualex 值。

2.5 不同追氮量下地上部干物质和产量的变化

收获期 N45+34 和 N45+68 处理间无显著差异; N45+101、N45+135、N45+169、N45+203 以及 SAT 225 之间差异不显著。说明过量追氮对地上部分生物量和籽粒干重影响不显著(表 5)。追氮量从 0 kg hm^{-2} 增加到 101 kg hm^{-2} , 籽粒产量显著增加。然而, N45+101 与 N45+135 处理间和 N45+101 与氮饱和对照 SAT 225 之间产量差异均不显著, N45+135、N45+169、N45+203 以及 SAT 225 之间产量无显著差异。表明地上部分干物质重和产量均随追氮量的增加而增加, 但达到一定的追氮量, 再施入氮素则无显著的影响。这是由于在一定的范围内, 随着氮肥用量的增加, 充足的氮素营养满足了作物生长对养分的需求, 当氮肥增加到一定量时, 作物对氮肥的吸收属于奢侈吸收, 叶片光合作用以及生物量不再增加, 达到饱和状态。

2.6 SPAD 值、Dualex 值、收获期地上部生物量及产量之间的相关性

图 2 显示, Dualex 值与 SPAD 值显著负相关($R^2=0.62$, $P=0.001$)。从表 6 可以看出, 吐丝后 11~46 d, 穗位叶 SPAD 值、SPAD-NSI 和 Dualex-NSI 均与收获期地上部分生物量显著正相关($P=0.001$); Dualex 值与收获期地上部分生物量显著负相关($P=0.001$)。SPAD 值、SPAD-NSI 和 Dualex-NSI 在各测定日期均

与产量存在显著正相关关系($P=0.001$), Dualex 值与产量之间存在显著负相关关系($P=0.001$)。

3 讨论

合理施用氮素是调控作物生长的重要手段之一。适时适量的氮素不仅可以提高作物产量, 还可以提高 NUE、降低 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋失、减少对地表水和地下水的污染, 降低叶片中多酚的含量^[3,14,20]。玉米吐丝开花以后的生殖生长阶段, 是形成产量的关键时期, 充足的氮素供应可以保持较高水平的叶绿素含量, 提高叶片光合作用强度和延长功能期, 是干物质积累和获得高产的保证。

本试验结果表明, SPAD 值随着追氮量的增加而增加, 但是施入过多的氮素对玉米穗位叶 SPAD 值没有显著的影响, 这是因为过量的氮素不会增加叶绿素含量和 SPAD 值^[15], 同时还容易导致 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋失, 降低 NUE。在吐丝后 11~46 d, N45+101、N45+135、N45+169 和 N45+203 各处理之间 SPAD 值和 SPAD-NSI 差异均不显著。Dualex 值随着追施氮肥量的增加而降低, 但是过量的氮素并未使 Dualex 值出现显著的变化。

NSI 0.95 是评估氮素水平的一个临界值, 当 NSI 小于 0.95 时, 表明作物缺氮, 当 NSI 大于 0.95 时, 表明作物不缺氮^[12,15]。本试验中 N45+101、N45+135、N45+169 和 N45+203 各处理 SPAD-NSI 不仅大于 0.95, 而且大于 1.00; N45+135、N45+169 和 N45+203 各处理 Dualex-NSI 不仅大于 0.95, 而且大于 1.00。表明追施氮肥 101、135、169 或 203 kg hm^{-2} 在玉米生长后期不仅可以满足玉米对氮素的需求,

表 5 不同追氮量条件下成熟期玉米地上部生物量、籽粒干重及籽粒产量的变化

Table 5 Influence of topdressing N rates on aboveground dry biomass, dry grain weight, and grain yield of corn at maturity stage

处理 Treatment	地上部分干物质重 Aboveground dry biomass (g plant ⁻¹)	籽粒干重 Dry grain weight (g plant ⁻¹)	产量 Grain yield (14.5% humidity, $\times 10^3 \text{ kg hm}^{-2}$)
N45	135.4±17.9 c	70.0±15.2 c	4.13±0.73 e
N45+34	197.2±43.7 b	109.8±27.2 b	6.92±1.50 d
N45+68	220.5±10.3 b	127.6±4.4 b	8.64±0.59 c
N45+101	258.7±23.0 a	153.7±11.9 a	10.35±0.91 b
N45+135	264.5±10.8 a	157.9±8.9 a	11.08±0.55 ab
N45+169	269.6±18.6 a	163.3±7.8 a	11.68±0.45 a
N45+203	255.6±9.6 a	157.8±6.5 a	12.07±0.34 a
SAT 225	280.8±30.1 a	149.6±11.3 a	11.18±0.49 ab

同一列内标以不同字母的值在 0.05 水平上差异显著(数据为平均值±标准差, $n=4$)。

Values within the same column followed by a different letter indicate significant difference at 0.05 probability level (data are mean±SD, $n=4$).

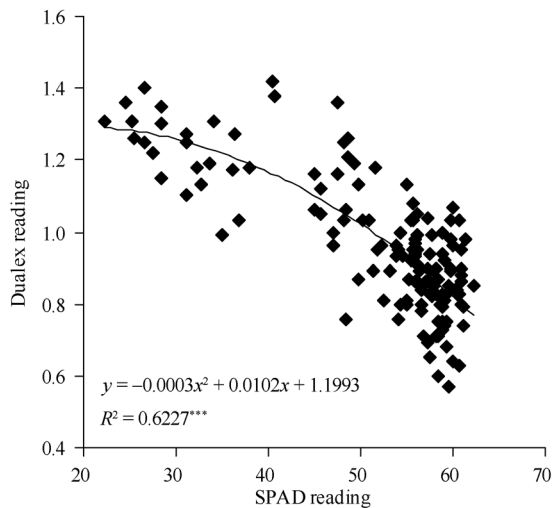


图 2 SPAD 值和 Dualex 值的相关性

Fig. 2 Correlation between SPAD reading and Dualex reading
数据为吐丝后 11~46 d 各处理数据。

Data are across all treatments from 11 d to 46 d after silking.

而且效果明显高于 SAT 225。

地上部干物质重和籽粒干重同样随着追施氮肥量的增加而增加, 但 N45+101、N45+135、N45+169 和 N45+203 各处理之间差异不显著, 并与氮饱和处理 SAT 225 之间无差异。玉米籽粒产量随着追施氮肥量的增加而显著增加, 但 N45+135、N45+169 和 N45+203 各处理之间差异不显著, 且与氮饱和处理 SAT 225 之间无显著差异, N45+101 同样与 SAT 225 差异不显著。当作物产量已经达到最大值时, 施入过多的氮肥并不能够继续增加作物的产量, 反而增加种植者的经济投入, 容易造成 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋失、增加对地表水和地下水的污染^[23]。

玉米在生长前期不需要太多的氮素, 因为在进入拔节期以前玉米对氮素的需求量很少^[24], 施入过

多的氮素将导致 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋失。因此播种时施氮肥 45 kg hm^{-2} , 然后在拔节期追施氮肥 101 kg hm^{-2} 或 135 kg hm^{-2} 即可满足玉米生长后期氮素需求并获得最大产量, 这使 SPAD 值、Dualex 值、地上部生物量以及产量不仅可以达到与氮饱和参考小区同样的效果, 而且减少玉米生育期内氮肥施用量。

SPAD 作为一种实时快速诊断作物氮素营养的工具已经得到了很多学者的认可^[9-12], Dualex 值与 SPAD 值显著负相关, 均可用来评估作物的氮素营养状态。一直以来, 以实验室常规测试为基础的作物氮素营养诊断和推荐施肥的传统方法不仅破坏植株的生长, 同时操作复杂、分析周期长, 难以实现作物生长期间的实时监测, 不利于推广应用。因此, 简便、实时快速、无损的作物氮素营养诊断方法近年来得到了广泛的关注, 是极有发展前途的, 在研究和实际应用中都已取得很大进展。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^[25]。在本研究中为了不破坏植株, 未进行玉米植株氮含量的测定, 在今后的研究工作中应该设立破坏取样区, 将破坏取样和不破坏取样的试验结果进行对比, 进一步使用 SPAD 值和 Dualex 值指导氮素在玉米上的应用, 并将试验方法和结果应用到其他地区 and 作物上, 达到实时实地作物氮素精确管理, 提高农业生产效益。

4 结论

基施氮 45 kg hm^{-2} , 在拔节期追施氮 101 kg hm^{-2} 或 135 kg hm^{-2} 即可满足玉米生长对氮素的需求并获得最大产量。可用 SPAD 值和 Dualex 值来评估追氮量对玉米生长的影响, 进而反过来确定追氮

表 6 SPAD 值、Dualex 值、SPAD-NSI 和 Dualex-NSI 分别与收获期地上部生物量和籽粒产量的相关性
Table 6 Correlation of SPAD reading, Dualex reading, SPAD-NSI and Dualex-NSI with aboveground dry biomass at harvest stage and corn grain yield

指标 Parameter		吐丝后天数 Days after silking					
		11 d	18 d	25 d	33 d	40 d	46 d
生物量 Aboveground dry biomass	SPAD 值 SPAD reading	0.88***	0.90***	0.86***	0.89***	0.91***	0.87***
	SPAD-NSI	0.91***	0.89***	0.84***	0.82***	0.86***	0.77***
	Dualex 值 Dualex reading	-0.79***	-0.76***	-0.78***	-0.73***	-0.82***	-0.79***
	Dualex-NSI	0.79***	0.73***	0.69***	0.68***	0.77***	0.75***
产量 Grain yield	SPAD 值 SPAD reading	0.90***	0.92***	0.91***	0.92***	0.95***	0.94***
	SPAD-NSI	0.87***	0.88***	0.83***	0.80***	0.87***	0.80***
	Dualex 值 Dualex reading	-0.86***	-0.84***	-0.84***	-0.80***	-0.88***	-0.85***
	Dualex-NSI	0.88***	0.87***	0.86***	0.86***	0.89***	0.88***

*** 表示在 0.001 水平上差异显著。*** Significantly different at 0.001 probability level.

量。因此, 在农业生产中, 可以使用 SPAD 叶绿素仪和 Dualex 仪评估追氮量以及追氮时期。

致谢: 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、Carl Bélec、Edith Fallon 和 Marcel Tétréault 在试验设计及进行中的帮助。

References

- [1] Elia A, Santamaria P, Serio F. Nitrogen nutrition, yield and quality of spinach. *J Sci Food Agric*, 1988, 76: 341–346
- [2] Samonte S O P B, Wilson L T, Medley J C, Pinson S R M, McClung A M, Lales J S. Nitrogen utilization efficiency: relationships with grain yield, grain protein, and yield-related traits in rice. *Agron J*, 2006, 98: 168–176
- [3] Ferguson R B, Hergert G W, Schepers J S, Gotway C A, Cahoon J E, Peterson T A. Site-specific nitrogen management of irrigated maize: yield and soil residual nitrate effects. *Soil Sci Soc Am J*, 2002, 66: 544–553
- [4] 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. *Soil Sci Soc Am J*, 1982, 46: 1212–1218
- [5] 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. *Agron J*, 2003, 95: 1213–1219
- [6] 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. *Agron J*, 1986, 78: 741–746
- [7] Russelle M P, Deibert E J, Hauck R D, Stevanovic M, Olson R A. Effects of water and nitrogen management on yield and ¹⁵N-depleted fertilizer use efficiency of irrigated corn. *Soil Sci Soc Am J*, 1981, 45: 553–558
- [8] Welch L F, Mulvaney D L, Oldham M G, Boone L V, Pendleton J W. Corn yields with fall, spring, and sidedress nitrogen. *Agron J*, 1971, 63: 119–123
- [9] Wood C W, Reeves D W, Duffield R R, Edmisten K L. Field chlorophyll measurements for evaluation of corn nitrogen status. *J Plant Nutr*, 1992, 15: 487–500
- [10] Arregui L M, Lasa B, Lafarga A, Iranneta I, Baroja E, Quemada M. Evaluation of chlorophyll meters as tools for N fertilization in winter wheat under humid Mediterranean conditions. *Eur J Agron*, 2006, 24: 140–148
- [11] Turner F T, Jund M F. Chlorophyll meter to predict nitrogen top-dress requirement for semidwarf rice. *Agron J*, 1991, 83: 926–928
- [12] Varvel G E, Schepers J S, Francis D D. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. *Soil Sci Soc Am J*, 1997, 6: 1233–1239
- [13] Schepers J S, Francis D D, Vigil M, Below F E. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. *Commun Soil Sci Plan*, 1992, 23: 2173–2187
- [14] Hussain F, Bronson K F, Yadvinder S, Bijay S, Peng S. Use of chlorophyll meter sufficiency indices for nitrogen management of irrigated rice in Asia. *Agron J*, 2000, 92: 875–879
- [15] Blackmer T M, Schepers J S. Use of a chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. *J Prod Agric*, 1995, 8: 56–60
- [16] Tremblay N, Bélec C. Adapting nitrogen fertilization to unpredictable seasonal conditions with the least impact on the environment. *Horttechnology*, 2006, 16: 408–412
- [17] Shapiro C A. Using a chlorophyll meter to manage nitrogen applications to corn with high nitrate irrigation water. *Commun Soil Sci Plan*, 1999, 30: 1037–1049
- [18] Caldwell M M, Gold W G, Harris G, Ashurst C W. A modulated lamp system for solar UV-B (280–320 nm) supplementation studies in the field. *Photochem Photobiol*, 1983, 37: 479–485
- [19] Cerovic Z G, Ounis A, Cartelat A, Latouche G, Goulas Y, Meyer S, Moya I. The use of chlorophyll fluorescence excitation spectra for the non-destructive in situ assessment of UV-absorbing compounds in leaves. *Plant Cell Environ*, 2002, 25: 1663–1676
- [20] Cartelat A, Cerovic Z G, Goulas Y, Meyer S, Lelarge C, Prioul J L, Barbottin A, Jeuffroy M H, Gata P, Agati G, Moya I. Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Res*, 2005, 91: 35–49
- [21] Goulas Y, Cerovic Z G, Cartelat A, Moya I. Dualex: a new instrument for field measurements of epidermal UV-absorbance by chlorophyll fluorescence. *Appl Optics*, 2004, 43: 4488–4496
- [22] Tremblay N, Wang Z J, Bélec C. Evaluation of the Dualex for the assessment of corn nitrogen status. *J Plant Nutr*, 2007, 30: 1355–1369
- [23] Delgado J A, Ristau R J, Dillon M A, Duke H R, Stuebe A, Follett R F, Shaffer M J, Riggensbach R R, Sparks R T, Thompson A, Kawanabe L M, Kunugi A, Thompson K. Use of innovative tools to increase nitrogen use efficiency and protect environmental quality in crop rotations. *Commun Soil Sci Plan*, 2001, 32: 1321–1354
- [24] Ma B L, Dwyer L M, Gregorich E G. Soil N amendment, effects on seasonal N mineralization and N cycling in maize production. *Agron J*, 1999, 91: 1003–1009
- [25] Jia L-L(贾良良), Chen X-P(陈新平), Zhang F-S(张福锁). Non-destructive measurement of crop nitrogen nutrition diagnosis. *World Agric* (世界农业), 2001, (6): 36–37 (in Chinese with English abstract)