

基于高光谱分析的玉米叶片氮含量分层诊断研究

张银杰, 王磊*, 白由路, 杨俐苹, 卢艳丽, 张静静, 李格

农业农村部植物营养与肥料重点实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081

摘要 为了明确不同生育时期进行玉米氮素营养诊断的叶片层位, 建立准确稳健的玉米氮素营养诊断模型, 以达到合理追施氮肥, 提高氮肥利用率的目的。试验采用单因素盆栽试验设计, 以玉米(郑单958)为研究对象, 应用高光谱技术, 分析了不同氮营养水平下不同生育时期不同层位玉米叶片的氮含量分布和变化规律及光谱响应特征; 并依据叶片氮含量与光谱反射率的相关关系, 叶片氮含量与全波段(400~2 000 nm)任意两两波段组合构建的比值光谱指数(RSI)的回归关系, 初步确定了不同生育时期进行氮素营养高光谱诊断的目标叶片, 筛选出最优的比值光谱指数, 建立了叶片氮素含量估算模型。结果表明: 玉米叶片氮含量: 上层>中层>下层; 随着玉米的生长, 在低氮条件下上层叶片氮含量呈先减少后增加(追肥)再减少趋势, 在高氮条件下呈减少趋势, 中下层叶片氮含量呈递减趋势。六叶期下层玉米叶片光谱反射率敏感范围较大, 相关性较强; 九叶期和灌浆期上层玉米叶片的光谱反射率敏感范围较广, 相关性较强; 开花吐丝期中层叶片的光谱反射率敏感范围较大, 相关性较强。六叶期选取下层叶作为诊断目标叶, 选取最佳比值光谱指数 RSI(1 811, 1 842)建立线性估算模型, 九叶期和灌浆期选取上层叶片作为诊断目标叶, 选取的最佳比值光谱指数分别为 RSI(720, 557), RSI(600, 511)建立线性估算模型, 开花吐丝期选取中层叶片作为诊断目标叶, 选取比值光谱指数 RSI(688, 644)建立线性估算模型。研究结果可为快速准确地利用光谱技术进行玉米叶片氮素营养诊断提供理论依据。

关键词 玉米叶片; 氮素含量; 光谱指数; 分层诊断

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)09-2829-07

引言

氮素是作物生长发育周期中重要的营养元素之一, 及时、准确地进行氮素管理, 既能保证产量又提高肥料效益, 减少环境污染。光谱技术能够快速、便捷、无损地获取作物的相关信息, 在作物氮素光谱营养诊断方面已经开展了许多研究^[1-2]。作物的氮素水平可以通过光谱指数进行反演, Inoue^[3]探究比较了构建的归一化光谱指数(NDSI)、比值光谱指数(RSI)、植被光谱指数以及多元回归统计方法反演水稻氮素水平的能力, 发现构建的比值光谱指数 RSI(D740, D522)对氮素的评估是最准确和稳健的。廖钦洪等^[4]比较了15个植被指数, 结果表明构建的归一化光谱指数 NDSI(754, 713)相比于其他植被指数更适合生姜叶片氮含量的估算, 模型估测精度 R^2 达 0.83。Wang 等^[5]结果表明, RSI

(822, 738)光谱指数可以作为监测水稻和小麦叶片氮积累的指标。有研究表明大喇叭口期光谱指数 DSI(564, 681)和 DSI(681, 707)构建的指数预测模型可以有效估测玉米叶片的氮素含量。

目前已有较多研究结果都显示, 使用特定的光谱参数^[6]和光谱指数^[7-8]可以较准确地预测叶片氮含量, 但不同生育期不同层位的玉米叶片, 光谱响应存在着较大的差异。研究不同层位叶片的光谱特性, 有利于提高光谱诊断的精度, 打破作物种间差异、种植区域和气候条件的限制。本试验根据不同生育期的特点进行了玉米叶片明确的分层, 系统地分析了各生育时期不同层位玉米叶片的光谱响应特征, 选取了各生育时期最适合作为玉米氮素营养诊断的叶片层位及最佳光谱指数, 并建立玉米叶片氮素含量的估算模型, 旨在为及时准确的作物氮素营养诊断及合理施肥提供参考。

收稿日期: 2018-07-26, 修订日期: 2019-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31572207), 国家科技支撑计划课题(2015BAD23B02), 国家重点研发计划子课题(2018YED0201303)资助

作者简介: 张银杰, 女, 1993年生, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所硕士研究生 e-mail: zzhangyinjie@126.com

* 通讯联系人 e-mail: wanglei02@caas.cn

1 实验部分

1.1 材料

试验于 2017 年 6 月至 9 月在中国农业科学院国际高新产业园内(廊坊万庄),供试土壤取自园区试验田,土壤类型为潮土,其肥力状况为:有机质含量 $2.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 8.83, 铵态氮含量 $13.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 硝态氮含量 $14.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。每个处理 12 盆,盆直径 33 cm,高 40 cm,每盆装土 16 kg,盆底封闭,埋于土壤中。

1.2 试验设计

试验供试土壤的常规推荐施肥量为: N: $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 : $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O : $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (土壤养分系统分析法 ASI 法^[9]),依据推荐施肥量分别增施和减施氮肥,设置 6 个施氮水平: N0, N1, N2, N3, N4, N5, 施肥量是大田试验的三倍分别为: 0, 180, 360, 540, 720, $900 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。磷钾肥也按推荐施肥量的 3 倍施用,施用量均为 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。根据土壤容量($1.13 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)换算成每公斤风干土的施肥量,土壤与基肥混匀装盆,施氮肥(尿素, N46%)基追比 4:6(8 月 18 日追施尿素),磷钾肥做基肥一次施入。

表 1 采样时间与部位

Table 1 Sampling time and location

日期	生育期	分层	部位
20170726	六叶期	上 下	上两叶 下两叶
20170814	九叶期	上 中 下	上两叶 中两叶 下两叶
20170831	开花吐丝期	上 中 下	穗上三叶 穗三叶 下三叶
20170918	灌浆期	上 中	穗上三叶 穗三叶

1.3 样品采集

由表 1 可知:六叶期和九叶期的叶片从上往下第一片展开叶开始分层,开花吐丝期以穗位叶以上三片叶为上层叶,穗位叶及以下两片叶为中层叶,中层叶下面三片叶为下层叶

片,灌浆期下层叶片有部分干枯未取样。九叶期与开花吐丝期 N0 处理下层叶片有部分干枯未取样。各时期测定光谱数据后采集叶片样品进行养分测定。

1.4 高光谱测定

高光谱数据采用 FieldSpec 光谱仪(美国 ASD 公司产)获得,利用叶片夹持器(自带光源)选取叶片的中部较宽(避免直接对着叶脉)的部分进行光谱测定,叶片夹持器测定使叶片处于密闭条件下,手柄中的光源部分直接夹紧玉米叶片所测部位,保证叶片水平且所测面积相同,使光谱数据获取的精确性和稳定性提高^[10]。

1.5 数据处理和统计分析

利用光谱处理软件 ViewSpecPro5.7 导出光谱数据,Excel 软件和 SPSS22 软件进行数据统计分析。借鉴 Inoue^[3] 的方法,本试验考察了全波段范围内任意波段两两组合的比值光谱指数对玉米叶片氮含量的估算效果,采用波段组合算法,以矩阵联立的形式,构建比值光谱指数(ratio spectral index, RSI)公式形式为

$$RSI(i, j) = R_i/R_j$$

式中: i 和 j 为 400~2 000 nm 范围内的任意两个波段, R_i 和 R_j 为波长 i 和波长 j 对应的光谱反射率为进一步优化比值光谱指数,筛选出对叶片氮含量敏感的波段位置,利用 MATLAB 编写程序把所有波段两两组合构建的比值光谱指数 $RSI(i, j)$ 与叶片氮含量线性拟合的决定系数结果用等值线图表示,颜色的深浅代表了决定系数的大小。

2 结果与讨论

2.1 不同生育时期不同层位叶片氮含量的变化

由表 2 可知:六叶期上层叶片氮含量高于下层叶片,施氮处理叶片氮含量显著高于不施氮处理,施氮处理之间变化不大,后三个时期玉米叶片氮含量:上层>中层>下层,低氮处理间叶片氮含量显著增加,高氮处理间差异不显著。

在整个玉米生育期中,六叶期叶片氮含量最高,随着玉米的生长,上层叶片低氮处理的氮含量呈先减少后增加(8 月 18 日追肥)再减少趋势,高氮处理的氮含量呈减少趋势,中层和下层叶片氮含量呈减少趋势,这是由于玉米生长中后期营养生长转向生殖生长,大部分氮素由营养器官转移至生殖器官。在同一生育期,同一施肥水平下叶片氮含量:上

表 2 叶片氮含量(%)

Table 2 Leaf nitrogen content(%)

处理	六叶期		九叶期			开花吐丝期			灌浆期	
	上/%	下/%	上/%	中/%	下/%	上/%	中/%	下/%	上/%	中/%
N0	1.94±0.27c	1.79±0.12e	0.61±0.07d	0.56±0.06d	—	0.75±0.11d	0.45±0.03e	—	0.84±0.08d	0.49±0.10c
N1	3.06±0.03b	2.35±0.04d	1.38±0.37c	1.37±0.26c	1.15±0.13c	1.64±0.17c	1.46±0.06d	0.99±0.11d	1.33±0.09c	0.70±0.07c
N2	3.21±0.06b	2.50±0.13cd	1.78±0.20b	1.86±0.03b	1.59±0.19b	1.95±0.12b	1.82±0.13c	1.35±0.24c	1.91±0.10b	1.47±0.07b
N3	3.45±0.13a	2.69±0.05bc	2.19±0.21a	2.18±0.19a	2.14±0.06a	2.23±0.09a	2.15±0.04a	1.86±0.09ab	2.04±0.06ab	1.65±0.22b
N4	3.40±0.07a	2.76±0.08b	2.33±0.09a	2.26±0.13a	2.22±0.06a	1.99±0.03b	1.97±0.08bc	1.71±0.06b	2.10±0.06a	1.88±0.06a
N5	3.45±0.12a	3.29±0.10a	2.35±0.05a	2.23±0.19a	2.08±0.15a	2.10±0.11b	2.09±0.12ab	2.01±0.04a	2.01±0.06ab	1.87±0.08a

注:表中不同字母表示差异达($p < 0.05$)显著水平

Note: Different letters in the same indicate significant difference ($p < 0.05$)

层>中层>下层,这是由于氮素是易于转运的营养元素。同一生育期同一层位在一定范围内随着氮肥的增施叶片氮含量呈先增加后平稳的趋势。

2.2 不同施氮水平下玉米叶片氮含量与光谱反射率的相关分析

由图 1(a)可知,六叶期上层叶片氮含量与 1 001~1 133 和 1 873~1 883 nm 波段处光谱反射率呈显著相关关系,下层叶片氮含量与 760~1 147, 1 148~1 163, 1 299~1 358 nm 波段处光谱反射率呈极显著相关关系,六叶期处于苗期与拔节期之间,而夏玉米在此时期吸收氮素少,吸收速度慢,缺氮时下层叶片氮素营养运输到上层叶片,下层叶片对于氮素缺乏较敏感。由图 1(b)可知,九叶期上层叶片含氮量与 411~1 300 和 1 880~2 001 nm 波段处光谱反射率呈极显著相关关系,中层叶片含氮量与 495~735 nm 波段处光谱反射率呈极显著相关关系,下层叶片氮含量与 531~718 nm 波段处光谱反射率呈极显著相关关系。相比之下,上层叶片氮含量的光谱反射率的相关性较强,九叶期处于大喇叭口期左右,是玉米吸收养分的关键时期,若氮素得不到及时供应,

上层叶对于氮素的缺乏在光谱的响应较下层叶更为敏感。由图 1(c)可知,开花吐丝期,在 460~729 和 751~1 296 nm 处上层叶片氮含量与光谱反射率呈极显著相关关系,在 474~728, 741~1 300, 1 301~1 391 和 1 601~1 839 nm 处中层叶片氮含量与光谱反射率呈极显著相关关系,在 501~734 和 1 986~2 047 nm 处的光谱反射率与下层叶片氮含量呈极显著相关关系,相比之下中层叶片氮含量与光谱反射率相关性较强。玉米的开花吐丝期是雌蕊和雄穗形成和发育的时期,吸收养分氮素营养速度快,数量多,其他叶片的氮素运输给上层叶和穗位叶(中层叶),而穗位叶的氮素又向雌蕊运输,中层叶片对于氮素的缺乏在光谱响应上较敏感。由图 1(d)可知,灌浆期上层叶片氮含量与 508~724, 740~1 300 和 1 301~2 259 nm 处光谱反射率呈极显著相关关系,中层叶片氮含量与 532~718, 736~1 300 和 1 301~2 229 nm 处光谱反射率呈极显著相关关系玉米生长后期(灌浆期),玉米氮素从营养器官转移到生殖器官中,其他叶片(上层和下层叶)的氮素大量向果穗叶(中层叶)转移,穗位叶的氮素再向果穗转移,上层叶片对于氮素缺乏在光谱响应上较敏感。

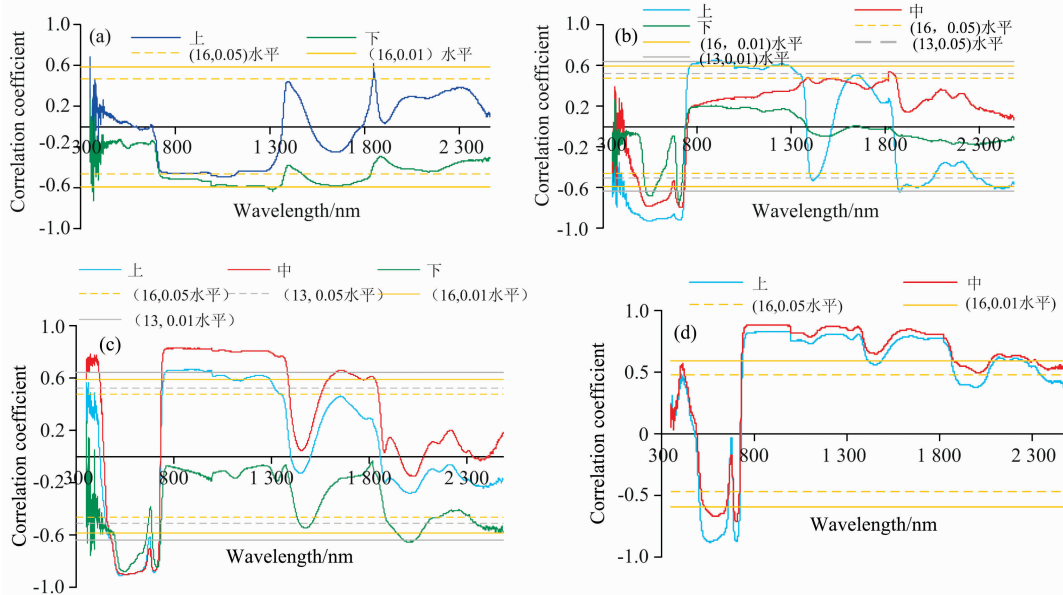


图 1 不同层位玉米叶片氮含量与光谱反射率的相关曲线

(a), (b), (c), (d)代表六叶期,九叶期,开花吐丝期,灌浆期 4 个生育时期

Fig. 1 Correlation curve between leaf total N and spectral reflectance at different layers

(a), (b), (c), (d) represent six-leaf, nine-leaf, anthesis-silking, filling stage four birth stages

2.3 不同生育期不同层位叶片氮含量与比值光谱指数的回归分析

如图 2(a)所示,上层叶片氮含量与比值光谱指数的敏感范围较小,敏感波段在 760 nm 处“红边位置”附近,图 2(b)可知,而下层叶片氮含量估算敏感的范围为 760~1 900 nm 波段,其中颜色较深的为 1 800 nm 附近“水分吸收带”。相比之下,下层叶片的光谱敏感范围较广,决定系数也较大,说明下层叶片的比值光谱指数能更准确地反演氮含量。

由图 3(a,b,c)分别可以看出,对上层叶片氮含量估算敏感的波段范围较大 410~780 nm,且颜色较深(红),对中层叶片氮含量估算敏感的波段 500~600 和 700~760 nm,颜色较上层叶片的浅,对下层叶片氮含量估算敏感的波段 500~580 和 700~750 nm。九叶期的上中下层叶片氮含量与比值光谱指数敏感波段区域相似,但上层叶片的光谱敏感范围较广,决定系数较大,中层叶片次之,下层叶片最小,说明上层叶片比值光谱指数能更准确地反演叶片氮含量。

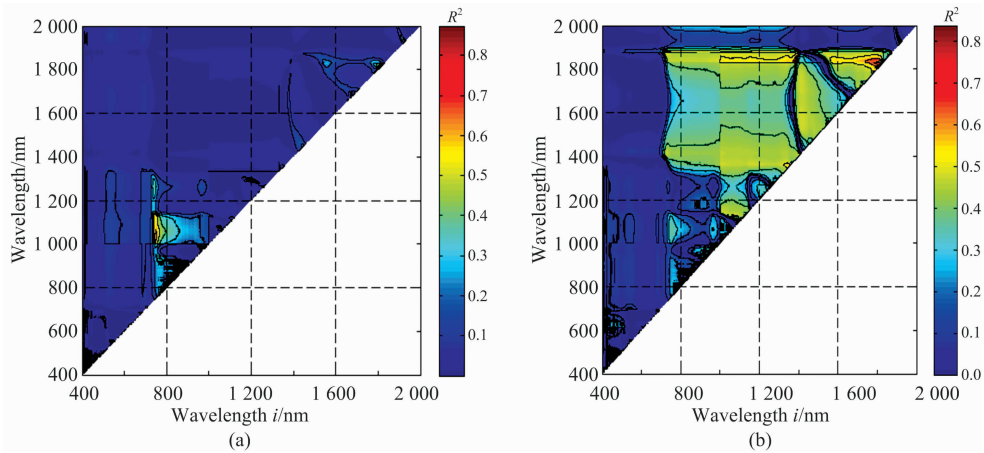


图 2 六叶期叶片氮含量与任意两波段组合 $RSI(i, j)$ 之间线性拟合的决定系数 (R^2) 的等值线图
(a), (b) 分别代表上, 下层位

Fig. 2 A contour map of the coefficient of determination (R^2) between leaf nitrogen content and $RSI(i, j)$ using the thorough combinations of two wavebands at i and j nm

(a), (b) represent upper, middle, lower layers

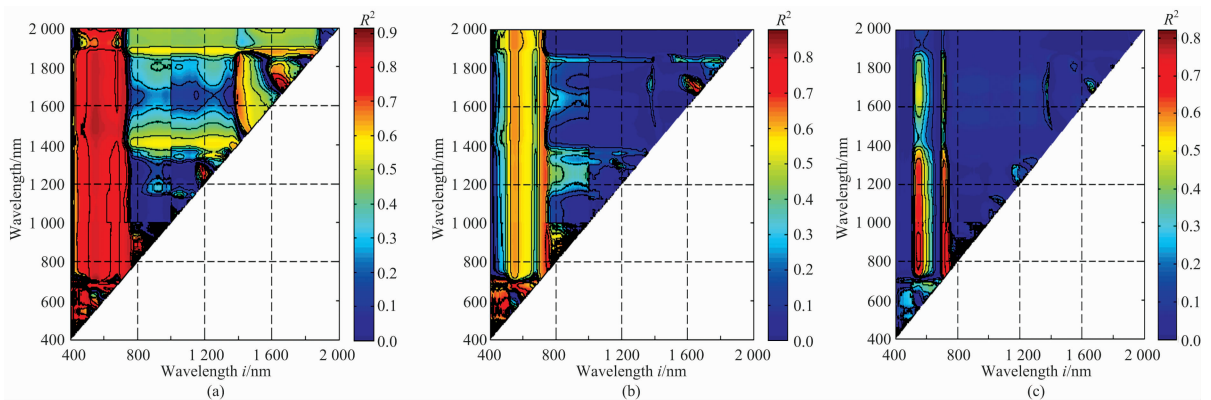


图 3 九叶期叶片氮含量与任意两波段组合 $RSI(i, j)$ 之间线性拟合的决定系数 (R^2) 的等值线图
(a), (b), (c) 分别代表上, 中, 下层位

Fig. 3 A contour map of the coefficient of determination (R^2) between leaf nitrogen content and $RSI(i, j)$ using the thorough combinations of two wavebands at i and j nm

(a), (b), (c) represent upper, middle, lower layers

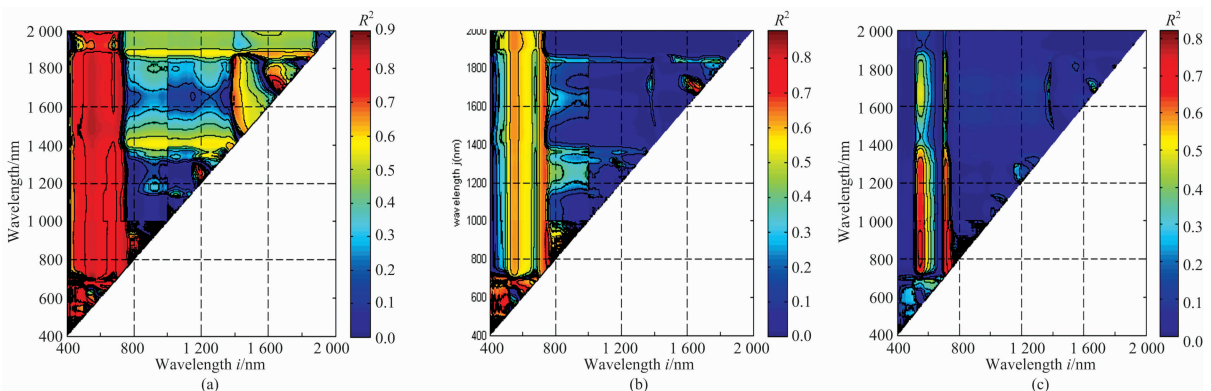


图 4 开花吐丝期叶片氮含量与任意两波段组合 $RSI(i, j)$ 之间线性拟合的决定系数 (R^2) 的等值线图
(a), (b), (c) 分别代表上, 中, 下层位

Fig. 4 A contour map of the coefficient of determination (R^2) between leaf nitrogen content and $RSI(i, j)$ using the thorough combinations of two wavebands at i and j nm

(a), (b), (c) represent upper, middle, lower layers

由图 4(a,b,c)分别可知：对上层叶片氮含量估算敏感波段为 500~780 nm，对中层叶片估算敏感波段范围较大 400~790 nm，且颜色较深(红)，对下层叶片氮含量估算敏感的波段为 500~600 和 750~780 nm。开花吐丝期的各层位叶片氮含量与比值光谱指数敏感波段范围相似，但中层叶片的敏感范围较大，且回归方程的决定系数较大，上层叶片次之，下层叶片最小，说明中层叶片比值光谱指数能更准确地反映叶

片氮含量。

由图 5(a,b)中可以看出，对上层叶片氮含量估算敏感波段 500~780 nm，颜色较深(红)；对中层叶片氮含量估算敏感波段 500~780 nm，颜色较浅(黄)。灌浆期的上中层叶片氮含量与比值光谱指数敏感波段一致，但上层叶片氮含量与比值光谱指数线性回归方程的决定系数较大。因此，该时期上层叶片的光谱响应更能反映玉米后期的氮素营养状况。

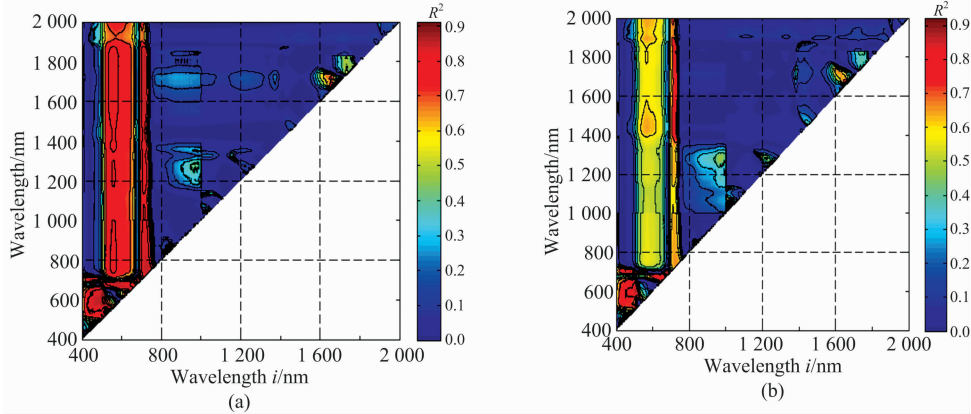


图 5 灌浆期叶片氮含量与任意两波段组合 RSI(i, j)之间线性拟合的决定系数(R²)的等值线图 (a): 上层位; (b): 中层位

Fig. 5 A contour map of the coefficient of determination (R²) between leaf nitrogen content and RSI(i, j) using the thorough combinations of two wavebands at i and j nm

(a): Upper layers; (b): Middle layers

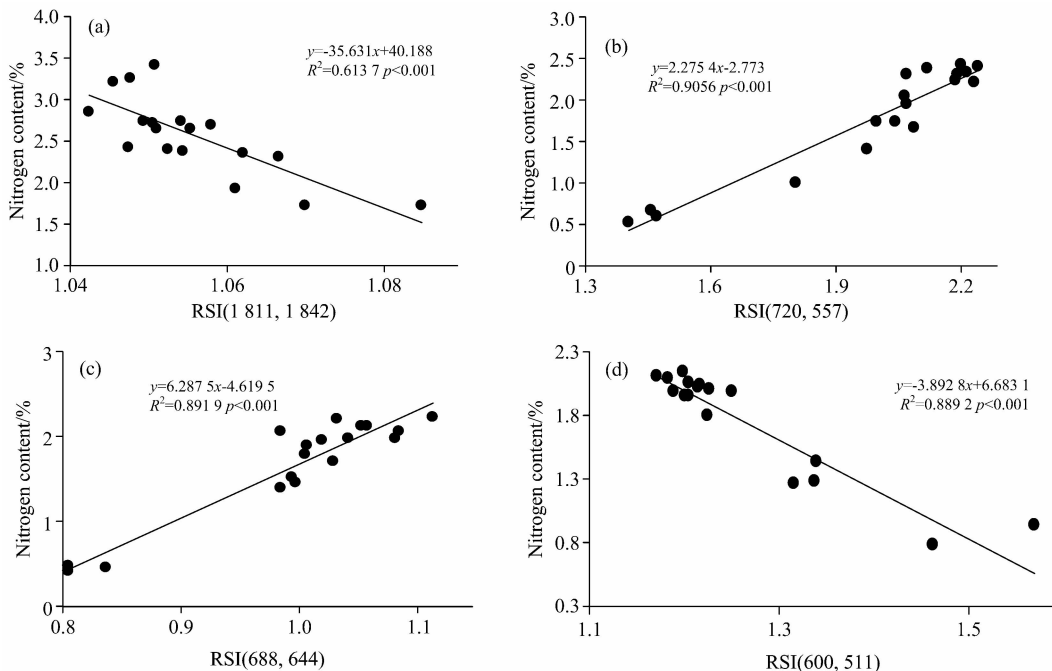


图 6 不同生育期最佳比值光谱指数叶片氮素估算回归方程

(a), (b), (c), (d)代表六叶期, 九叶期, 开花吐丝期, 灌浆期 4 个生育时期

Fig. 6 Regression equations of leaf nitrogen content and optimal spectral indices in different stag

(a), (b), (c), (d) represent six-leaf, nine-leaf, anthesis-silking, filling stage four birth stages

2.4 不同生育期最佳叶片光谱指数与叶片氮含量的回归方程

综合分析，选取各时期不同处理叶片氮含量与原始光谱反射率及比值光谱指数敏感性较强的叶片作为诊断目标叶，

六叶期选取下层叶片作为叶片氮素诊断的目标叶,如图 6 选出最佳的比值光谱指数 (ratio spectral index, RSI) (1 811, 1 842) 与叶片氮含量建立线性回归方程,拟合度 R^2 为 0.614 达极显著水平。九叶期和灌浆期选取上层叶片作为氮素营养诊断的目标叶,选出最佳比值光谱指数分别为 RSI(720, 557), RSI(600, 511) 建立线性回归方程,拟合度 R^2 分别为 0.906, 0.889 达极显著水平。开花吐丝期选取中层叶片作为叶片氮素营养诊断的目标叶,选出 RSI(688, 644), 建立回归方程,拟合度 R^2 为 0.892 达极显著水平。不同时期选取了不同层位的叶片作为光谱诊断的目标叶,选取的最佳光谱指数的波段组合也不同,分析认为作物的光谱反射或发射特性是由其化学和形态学特征决定的,不同层位叶片内部结构存在差异,作物的形态特征和体内生化组分随着作物生长而不断变化,导致了不同生育时期不同层位叶片对光谱的响应存在差异。

3 结 论

分析了夏玉米不同施氮水平下各生育期不同层位叶片氮

素含量与光谱反射率的关系,确定了进行玉米氮素高光谱诊断的叶片层位,并选取最佳比值光谱指数拟合了各个时期叶片氮含量的估测模型,得到了以下主要结论:

(1) 随着生育期延长,叶片氮含量呈减少趋势,在同一生育期,同一施肥水平下叶片氮含量:上层>中层>下层。在一定范围内同一时期同一层位叶片氮含量随着氮肥的增施呈先增加后平稳趋势。

(2) 六叶期下层叶片氮含量与光谱反射率相关关系达显著水平的波段范围更广,相关性更强。九叶期和灌浆期上层叶片氮含量与光谱反射率相关关系达极显著水平的波段范围更广,相关性更强。开花吐丝期中层叶片氮含量与光谱反射率相关关系达极显著水平的波段范围更广,相关性更强。

(3) 六叶期选取下层叶片,九叶期和灌浆期选取上层叶片,开花吐丝期选取中层叶片作为叶片氮素诊断对象,分别以 RSI(1 811, 1 842), RSI(720, 557), RSI(600, 511) 和 RSI(688, 644) 构建的估算模型反演叶片氮含量效果较好,其估算模型的精度和稳定性,以及在不同品种不同地区的应用上仍需要进一步验证。

References

- [1] GUO Chao-fan, DUAN Fu-zhou, GUO Xiao-yu, et al(郭超凡, 段福洲, 郭道宇, 等). *Acta Ecologica Sinica(生态学报)*, 2014, 34(17): 4839.
- [2] WANG Ren-hong, SONG Xiao-yu, LI Zhen-hai, et al(王仁红, 宋晓宇, 李振海, 等). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2014, (19): 191.
- [3] Inoue Y, Sakaiya E, Zhu Y, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 126(6829): 210.
- [4] LIAO Qin-hong, LI Hui-he, ZHANG Qin, et al(廖钦洪, 李会合, 张 琴, 等). *Research of Agricultural Modernization(农业现代化研究)*, 2017, 38(2): 315.
- [5] Wang Wei, Yao Xia, Tian Yongchao, et al. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(12): 2001.
- [6] LI Yuan-yuan, CHANG Qing-rui, LIU Xiu-ying, et al(李媛媛, 常庆瑞, 刘秀英, 等). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2016, 32(16): 135.
- [7] ZHANG Xiao-yuan, ZHANG Li-fu, ZHANG Xia, et al(张潇元, 张立福, 张 霞, 等). *Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学)*, 2017, 50(3): 474.
- [8] Jin Xiuliang, Xu Xingang, Feng Haikun, et al. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2014, 16(3): 498.
- [9] JIN Ji-yun, BAI You-lu, YANG Li-ping(金继运, 白由路, 杨俐苹). *High Efficient Technology and Equipment for Soil Testing(高效土壤养分测试技术与设备)*. Beijing: China Agriculture Press(北京: 中国农业出版社), 2006. 148.
- [10] LIU Xiao-jun, TIAN Yong-chao, YAO Xia, et al(刘小军, 田永超, 姚 霞, 等). *Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学)*, 2012, 45(3): 435.

Nitrogen Nutrition Diagnostic Based on Hyperspectral Analysis about Different Layers Leaves in Maize

ZHANG Yin-jie, WANG Lei* , BAI You-lu, YANG Li-ping, LU Yan-li, ZHANG Jing-jing, LI Ge

Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract In order to clarify the location of nitrogen nutrient diagnosis of maize leaves at different growth stages, and to establish an accurate and robust model to diagnose maize's nitrogen nutrition, which aims to guide rational fertilization and improve recovery rate, in this experiment, a single factor pot experiment was designed, and maize (Zhengdan 958) was used as the research object to study the distribution and variation of nitrogen content in different layers of leaf under different nitrogen nutrition levels. The distribution and variation of N content and the spectral response characteristics of maize leaves were analyzed. And the correlation relationship between nitrogen content and spectral reflectance of different layers leaves at different growth stages was investigated. Moreover, the regression relationship between the leaf nitrogen content and the ratio spectral index (RSI) which was composed of any two bands between 400~2 000 nm was explored. According to these analyses, leaf layer, optimal RSI and estimation models were initially determined at different stages for nitrogen nutrition diagnosis by spectral technique. The main results are as follows: The results indicate that the maize's nitrogen content in different layers is as follows: the upper layer>the middle layer>the lower layer; and that as the stages of growth forward, leaves' nitrogen content in upper layer, under the condition of low-nitrogen, appears to first decrease and then increase (after manuring) and decrease again while keeping the tendency of decrease under the condition of high-nitrogen, with the leaves' nitrogen content in the levels of middle and low appearing to decrease. At the Six-leaf stage, the lower layer of leaves has a larger sensitivity range and a stronger correlation coefficient. At Nine-leaf and Filling stage, spectral reflectance of the upper layer maize leaves was more sensitive and correlated. At the flowering and silking stage, spectral reflectance of the middle layer leaves was more sensitive and relevant. SO the lower leaves were selected as the diagnosis target at the Six-leaf stage, and the optimal ratio spectral index RSI (1 811, 1 842) was selected to establish the linear estimation model. The upper leaves were selected as the diagnostic target at the Nine-leaf stage and the Filling stage, and the optimal ratio spectral indices were RSI (720, 557), RSI (600, 511) to establish the linear estimation model, respectively. The middle leaves were selected as the diagnostic target during the anthesis-silking stage, and the RSI (688, 644) spectral index was selected to establish the estimation model. The research results could provide a theoretical basis for rapid and accurate nitrogen nutrition spectrum diagnosis method in maize or other crop.

Keywords Maize leaf; Nitrogen Content; Spectral index; Diagnosis layer

(Received Jul. 26, 2018; accepted Jan. 21, 2019)

* Corresponding author