

基于叶面积指数构建滴灌玉米营养生长期临界氮稀释曲线

贾彪, 付江鹏

(宁夏大学农学院, 银川 750021)

摘要:明确宁夏引黄灌区基于叶面积指数(leaf area index, LAI)的滴灌玉米临界氮稀释曲线模型及其适用性,探讨以氮营养指数(nitrogen nutrition index, NNI)为监测指标对滴灌水肥一体化模式下玉米氮素营养状况诊断的可行性。该研究于2017—2018年开展了不同施氮量(0~450 kg/hm²)下4个田块的试验,采用系统分析和统计建模的方法,分析了LAI和植株氮浓度(plant nitrogen concentration, PNC)的定量关系,构建和验证基于LAI的临界氮稀释曲线模型,并建立理论框架,将基于LAI的临界氮曲线与基于植株干物质(plant dry matter, PDM)的临界氮浓度曲线关联,比较基于LAI和PDM的临界氮曲线之间的差异。结果表明,玉米营养生长期临界氮和LAI符合幂函数关系,拟合模型的评价指标均方根误差(root mean square error, RMSE)和标准化均方根误差(normalized RMSE, n-RMSE)的结果分别为0.09和4.13%,模型具有较好的稳定性。在试验氮素水平范围内,不同生育时期NNI随施氮量的增加而增加,变化范围为0.53~1.34,NNI可以准确地反映滴灌玉米氮素营养状况。在非限氮处理下,玉米植株氮素吸收与LAI成正比,LAI与PDM的异速生长参数接近理论值2/3。构建的基于LAI的临界氮曲线可以有效地识别玉米拔节期至吐丝期植株所需的氮状态,为宁夏滴灌玉米氮肥精确管理提供了一种新的评价方法。

关键词: 氮素; 诊断; 滴灌水肥一体化; 玉米; 临界氮稀释曲线; 叶面积指数; 氮营养指数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.06.008

中图分类号: S365; S512.1 文献标志码: A 文章编号: 1002-6819(2020)-06-0066-08

贾彪, 付江鹏. 基于叶面积指数构建滴灌玉米营养生长期临界氮稀释曲线[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 66—73.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.06.008 <http://www.tcsae.org>

Jia Biao, Fu Jiangpeng. Critical nitrogen dilution curve of drip-irrigated maize at vegetative growth stage based on leaf area index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(6): 66—73. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.06.008 <http://www.tcsae.org>

0 引言

氮是影响作物生长发育和潜在生产力的主要营养元素。在玉米生产上,合理施用氮肥,减少氮肥用量,提高氮肥利用效率已成为精细化农业管理的核心^[1]。近50 a来,中国夏玉米产量逐年增加,主要得益于氮肥的高效利用以及先进的作物育种技术提升^[2-6]。然而,在当前中国以大范围小农户为主的大田玉米种植生产中,不合理施用氮肥导致环境污染问题日益突出,与氮肥相关的水体、土壤和大气等污染成了现代农业研究面临的一个严重问题^[7-8]。因此,优化玉米不同生育时期的氮肥施用量对于提高氮肥利用效率、保护环境和实现农业可持续发展具有重要意义。

目前,在准确评价作物氮素营养状态,优化作物生育期氮肥管理的研究上,前人多采用叶绿素仪和光谱遥感图像等技术进行监测与诊断^[9-12],上述方法的共同缺点是当作物处于氮素奢侈吸收时,所得的诊断结果并不可靠^[13],限制了在作物氮奢侈消费评估中的分析应用。

因此,Greenwood等^[14]总结了作物生长和氮素吸收的规律,提出了临界氮浓度(critical nitrogen concentration, N_c)的概念,即作物最大生长所需的最低氮浓度。 N_c 因其在作物氮诊断中的准确性和稳定性而受到世界各国的广泛关注。Plénet等^[15]提出了一种基于植株干物质(plant dry matter, PDM)构建玉米 N_c 稀释曲线的方法,其描述为 $N_c=aPDM^{-b}$ (a 、 b 为系数)。后经Herrmann等^[16]证实,在法国构建的曲线对诊断德国和加拿大东部玉米植株氮状况是有效的。此外,相继也有国内学者基于PDM和叶片干物质分别建立了不同地区夏玉米 N_c 稀释曲线^[2,17-18]。相比而言,构建的模型曲线系数低于法国,其原因可能是由于气候和区域的差异所造成的^[2,17]。

基于PDM的 N_c 曲线可以为玉米氮素营养提供有效的管理信息,但对现代农业氮素管理的适应有一定的局限性,PDM数据点的获取需要通过繁琐的步骤^[19],尽管可以使用遥感技术来估计PDM,但该工具的估计精度无法适应与PDM空间分布高度相关的变化^[20]。而叶面积指数(leaf area index, LAI)是群体结构的重要量化指标,是反映作物长势与预测作物产量的重要农学参数^[21-22]。随着叶面积仪在农业上的广泛应用,LAI相较于植株干物质更容易获取。这说明LAI是构建 N_c 稀释曲线较为理想的农学指标,在现代农业生产中可以克服基于PDM诊断氮素营养相关的问题。

基于LAI的 N_c 曲线已在冬小麦^[21]和水稻^[7,22]等作物

收稿日期: 2019-11-04 修订日期: 2020-02-01

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2019AAC03068); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2019BBF03009, 2018BBF02004); 国家自然科学基金项目(31560339); 宁夏大学草学一流学科建设项目(NX-YLXK2017A01); 西夏区科技局项目(2018XXKJ01)

作者简介: 贾彪, 博士, 副教授, 主要从事信息技术与精准农业研究。

Email: jiabiao2008@163.com

中构建。Lemaire 等^[23]研究表明欧洲和澳大利亚玉米植株对氮素的吸收与 LAI 成正比,在密植条件下玉米的生长模式是等距的,而这些观点尚未在中国西北宁夏地区种植的滴灌玉米上进行验证。此外,相关研究也尚未探讨基于 LAI 和基于 PDM 的 N_c 稀释曲线之间的理论关系。因此,本研究致力于构建基于 LAI 的滴灌玉米 N_c 曲线,将其与现有不同作物品种的 N_c 稀释曲线进行比较,验证该曲线在水肥一体化条件下滴灌玉米中评估作物氮素状态的可靠性,并建立理论框架,链接基于 LAI 和 PDM 的 N_c 曲线之间关系,从而为宁夏灌区滴灌玉米生长期的氮状况评估和田间氮素管理提供方法。

1 材料与方法

1.1 试验设计

2017—2018 年 4—9 月利用 2 个玉米品种在银川市平吉堡农场 (106°1'47"E,38°25'30"N) 和永宁县宁夏大学试验农场 (106°14'12"E,38°13'03"N) 进行了 4 个田间试验。关于玉米品种、播种日期、氮处理、土壤肥

力、取样和收获时期详见表 1,平吉堡和永宁玉米生长期日平均温度与日降雨量见图 1。玉米生育期内采用滴灌水肥一体化技术,由潜水泵将水通过 75 mm PE 管抽送到试验小区,与 75 mm PE 管接口处安装水表准确计量,32 mm PE 管做支管连接到 16 mm 毛管。施肥由施肥罐随水施入,在窄行玉米中间设置 1 根滴灌带,即 1 根滴灌带控制 2 行玉米水肥用量,滴头间距为 30 cm,滴头流量 2.5 L/h,滴头工作压力 0.1 MPa,为保证灌水与施肥的均匀性,采用横向供水方式。供试氮肥为尿素 (总 N≥46.4%,质量分数,下同),磷肥为磷酸二氢钾 (含 52% P₂O₅ 和 34% K₂O),钾肥为硫酸钾 (含 52% K₂SO₄),磷钾肥用量分别为 138 和 120 kg/hm²。氮磷钾肥均为水溶性肥料,分别随水施入。整个生育期共施肥 8 次,分别为苗期 1 次、拔节至大喇叭口期 3 次、抽雄吐丝期 1 次,灌浆期 3 次,每次施肥量占总施肥量的比例分别为苗期 10%、拔节至大喇叭口期 45%、抽雄吐丝期 20% 和灌浆期 25%。小区面积为 67.5 m²,3 次重复,种植密度约为 9 万株/hm²。

表 1 田间试验状况
Table 1 Field experiments

编号 No.	年份 Year	地点 Site	pH 值 pH value	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)	播种日期 Sowing date	收获日期 Harvesting date	品种 Cultivar	氮处理 N treatment/ (kg·hm ⁻²)	取样时期 Sampling stage
1	2017	平吉堡	7.98	11.45	0.8	37.42	19.04	102.52	04-26	09-16	天赐 19	0 (N0)、 90	拔节期 (V6)、
2	2018	平吉堡	7.77	12.82	0.75	36.82	17.37	95.31	04-28	09-18	天赐 19	(N1)、 180 (N2)、 270	小喇叭口 期(V10)、 大喇叭口 期(V12)、
3	2017	永宁	8.44	8.07	0.98	40.47	18.33	106.25	04-22	09-18	宁单 19	(N3)、 360 (N4)、	抽雄期 (VT)、 吐丝期 (R1)
4	2018	永宁	8.57	14.83	0.92	39.44	20.63	111.25	04-20	09-22	宁单 19	450 (N5)	

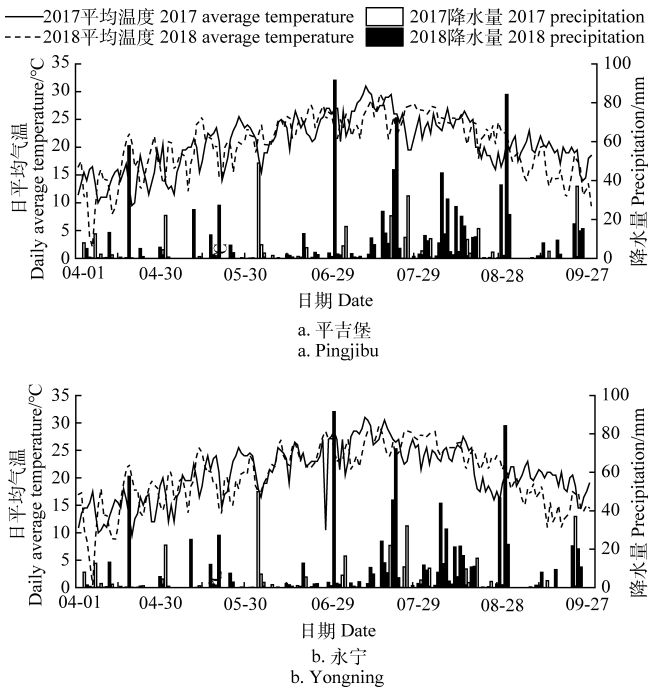


图 1 玉米生育期气温及降水量

Fig.1 Air temperature and precipitation during growth stage of maize

1.2 叶面积、干物质和氮含量

于玉米 V6 至 R1 时期,每个小区选取长势一致的 3 株,采用长宽系数法 (0.75 倍的长乘以宽) 计算植株绿叶面积以计算叶面积指数 (leaf area index, LAI),并将其带回实验室,以测量玉米每个采样日期的地上部植株干物质和植株氮浓度 (plant nitrogen concentration, PNC)。分成为茎、叶和穗 3 部分,采用干燥法对干物质质量进行测定,样品研磨并通过 1 mm 筛,采用微量凯氏定氮法测定 PNC。

1.3 模型描述

1.3.1 临界氮浓度模型建立

根据 Justes 等^[24]提出的 N_c 稀释曲线计算方法,建模步骤如下: 1) 方差分析每次取样的 LAI 和 PNC 有无显著差异,将其分为氮限制组和非氮限制组; 2) 线性拟合限氮处理的 PNC 和 LAI 数据; 3) 垂直线用于表示非限氮处理之间的 LAI 平均值为本次取样的最大 LAI; 4) 使用每个采样日期的斜线和垂直线之间的交点坐标确定 N_c 值。基于 LAI 的临界氮效应稀释曲线方程式为

$$N_c=aLAI^{-b}$$
 (1)

式中 N_c 代表临界氮浓度, %; LAI 代表叶面积指数; a 和

b 均为模型的参数。

1.3.2 临界氮浓度模型验证

采用均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和标准化均方根误差 (n-RMSE) [25-26] 来评价模型。参照 Jamieson 等 [27] 提出的标准, n-RMSE < 10%, 模型稳定性极好; 10% ≤ n-RMSE < 20%, 模型稳定性较好; 20% ≤ n-RMSE < 30%, 模型稳定性一般; n-RMSE ≥ 30%, 模型稳定性较差。

1.4 临界氮吸收和氮营养指数

临界氮吸收 (N_{uc} , kg/hm²) 由式(1)两边乘以 PDM, 计算得到 N_{uc} 与 PDM 之间的关系 [15]:

$$N_{uc} = aPDM^{1-b} \quad (2)$$

式中 PDM 为植株干物质质量, t/hm²。将实际 PNC 除以 N_c 浓度确定夏玉米在每个采样日的氮营养指数 [15], 如式 (3) 所示:

$$NNI = PNC / N_c \quad (3)$$

式中 PNC 为植株氮浓度, %; NNI 为氮营养指数。当 NNI=1 时, 作物氮状态是最佳的; 当 NNI>1, 表示氮过量; 当 NNI<1, 表示植株体内缺氮。

1.5 基于 LAI 和植株 DM 的 N_c 曲线之间关联的理论框架

在非限氮条件下, 玉米 LAI 与植株氮素吸收呈显著正相关关系 [15]。当 LAI 和 PDM 之间的异速生长关系的比例系数与 N_{uc} 和 PDM 之间的异速生长关系的比例系数相等时, 在作物的营养生长期, 植株 N_{uc} 和 LAI 之间有可能形成严格的比例关系 [19]。因此, 在非限氮处理下, N_{uc} 和 LAI 之间的关系可以假定为

$$N_{uc} = eLAI^c \quad (4)$$

式中 c 为指数; e 为植株固有的临界氮吸收量, kg/hm²。当 LAI 为 1 时, 参数 e 代表植株 N_{uc} 。在式 (4) 的两侧同时除以 PDM 可以得到 N_c (式 (5))。由于 LAI 与 PDM

呈异速生长关系 [23] (式 (6)), PDM 可以通过式 (6) 的转换利用式 (7) 计算。因此, 利用式 (8) 计算 N_c 值, 参数 e' 表示 LAI 为 1 时的理论植株 N_c 值, 由式 (9) 确定。

$$N_c = (eLAI) / PDM \quad (5)$$

$$LAI = kPDM^c \quad (6)$$

$$PDM = (LAI/k)^{1/c} \quad (7)$$

$$N_c = (eLAI) / (LAI/k)^{1/c} = e'LAI^{(c-1)/c} \quad (8)$$

$$e' = ek^{1/c} \quad (9)$$

式中 k 为系数。

1.6 数据处理

采用 Excel 2013 软件进行数据整理与计算, 采用 SPSS22.0 软件进行单因素方差分析和多重比较, 绘图采用 Origin2018 软件。4 个试验中利用 2017 年试验 1 和 3 的数据构建模型, 利用 2018 年试验 2 和 4 的数据进行模型验证。

2 结果与分析

2.1 叶面积指数和植株氮浓度动态变化

表 2 为 2017 年不同品种和施氮水平下滴灌玉米叶面积指数及植株氮浓度的动态累积过程。由表 2 可知, 随着玉米生长发育进程的推进, 其 LAI 不断增加, 而 PNC 下降。试验 1 和 3 是在不同的品种和地点下进行的, 但 LAI 和 PNC 的变化趋势是相似的。在不同的试验中, LAI 和 PNC 均随着施氮量的增加而增加, 但是施氮量达到一定水平后, LAI 增加缓慢趋于平稳, 而高氮处理下植株具有较高的氮浓度。天赐 19 的 LAI 的变化范围为 1.13~6.03, PNC 的变化范围为 1.35%~3.24%; 宁单 19 的 LAI 的变化范围为 1.26~6.21, PNC 的变化范围为 1.22%~3.31%。永宁栽培玉米品种宁单 19 的 LAI 较高于平吉堡, 但 PNC 在不同品种中的变化较小。

表 2 2017 年不同施氮量下玉米叶面积指数和植株氮浓度动态变化

指标 Index	品种 Cultivar	生育时期 Growth stage	处理 Treatment					
			N0	N1	N2	N3	N4	N5
叶面积指数 Leaf area index	天赐 19 Tianci19	V6	1.13d	1.48c	1.72b	2.32ab	2.34ab	2.41a
		V10	1.37d	1.65c	2.44b	2.92a	3.01a	3.03a
		V12	1.99d	2.65c	3.57bc	4.01ab	4.09a	4.14a
		VT	2.43d	3.41c	4.07b	4.85a	4.85a	4.87a
		R1	3.09c	4.11bc	4.97b	5.93a	5.97a	6.03a
	宁单 19 Ningdan19	V6	1.26d	1.57c	2.12bc	2.23abc	2.36ab	2.47a
		V10	1.44d	1.73c	2.55b	3.08ab	3.28a	3.31a
		V12	2.09e	2.58d	3.69bc	4.01ab	4.22a	4.29a
		VT	2.58d	3.36c	4.49b	5.01ab	5.09ab	5.19a
		R1	3.35d	4.44c	5.27b	6.13a	6.17a	6.21a
植株氮浓度 Plant nitrogen concentration/%	天赐 19 Tianci19	V6	2.19d	2.47c	2.68b	2.91ab	3.17a	3.24a
		V10	2.02e	2.21d	2.31cd	2.42c	2.89b	3.11a
		V12	1.64d	1.89c	2.11b	2.65ab	2.79a	2.87a
		VT	1.51d	1.71c	1.89b	2.30ab	2.35ab	2.55a
		R1	1.35d	1.51c	1.71b	2.21a	2.25a	2.28a
	宁单 19 Ningdan19	V6	2.11e	2.39d	2.66cd	2.87c	3.09b	3.31a
		V10	2.02e	2.23de	2.38d	2.55bc	2.69b	2.92a
		V12	1.84de	1.98d	2.19c	2.39abc	2.48ab	2.62a
		VT	1.51d	1.71c	1.84bc	2.22abc	2.29ab	2.44a
		R1	1.22e	1.50d	1.69c	2.11b	2.21ab	2.31a

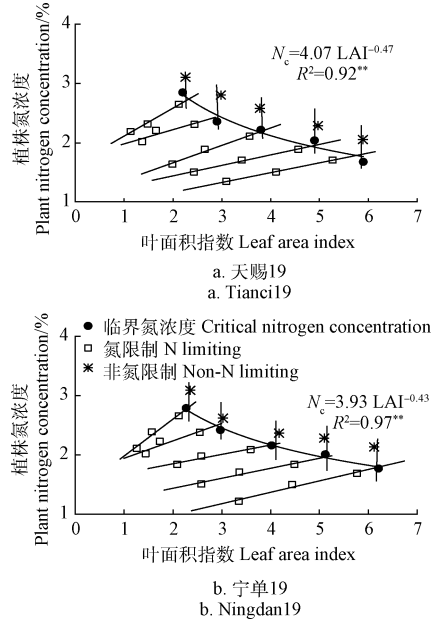
注: 同一行数据具有相同字母的表示处理间无显著差异 ($P>0.05$)。

Note: Data with the same letters along line are not significantly different among treatments ($P>0.05$).

2.2 临界氮稀释曲线构建及验证结果

2.2.1 模型构建

根据 Justes 等^[24]提出的曲线构建方法,利用试验 1 和 3 的数据资料,在滴灌玉米营养生长期构建临界氮浓度稀释曲线。滴灌玉米临界氮浓度随 LAI 的增加呈下降的趋势,其变化趋势可以通过幂函数方程来拟合。天赐 19 和宁单 19 的临界氮稀释曲线见图 2。



注: N_c 为临界氮浓度, %。 R^2 为决定系数。 **, $P < 0.01$ 。下同。
Note: N_c is critical nitrogen concentration, %. R^2 is determining coefficient. **, $P < 0.01$. Same as below.

图2 2017年不同玉米品种临界氮稀释曲线比较

Fig.2 Comparison of critical nitrogen dilution curves of different maize varieties in 2017

基于 LAI 构建了不同品种临界氮稀释曲线模型 (图 2)。2 个模型中, 参数 a 分别为 4.07 和 3.93, 参数 b 分别为 -0.47 和 -0.43。为了进一步分析 2 个品种之间的显著性差异, 首先将幂函数模型进行直线化处理, 即 $\ln N_c = \ln a + b \ln LAI$, 天赐 19 和宁单 19 的直线化模型分别为 $\ln N_c = 1.40 - 0.47 \ln LAI$ 和 $\ln N_c = 1.37 - 0.43 \ln LAI$ 。采用协方差分析方法, 分别分析 2 个品种之间的斜率与截距间差异, 结果显示, 天赐 19 和宁单 19 斜率与截距的 P 值分别为 0.957 和 0.648, 都大于 0.05, 说明 2 个品种之间没有显著性差异。因此, 将 2 个品种的曲线并置拟合, 形成滴灌玉米统一的临界氮稀释曲线 (图 3), a 为 3.99, b 为 -0.45。

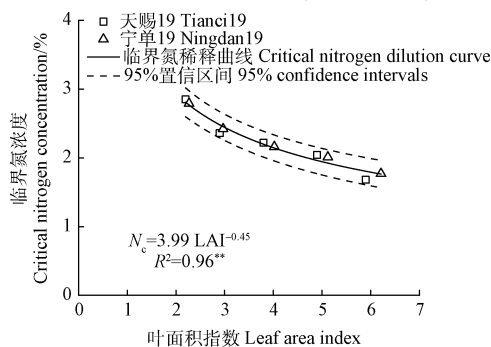


图3 基于叶面积指数的玉米临界氮稀释曲线

Fig.3 Critical nitrogen dilution curve of maize based on leaf area index (LAI)

2.2.2 模型验证

利用 2018 年试验 2 和 4 的数据资料对本研究中确定的临界氮稀释曲线进行了验证, 由图 4 可知, 将独立数据组中获得的最大 LAI 代入临界氮稀释曲线后, 对比实测值和模拟值, 利用 1:1 图来直观反映模型的拟合度, 经计算均方根误差 RMSE 为 0.09, 标准化均方根误差为 4.13%, 稳定度极高, 表明本研究基于 LAI 构建的临界氮浓度稀释曲线可用于宁夏引黄灌区滴灌玉米氮素营养的评估与诊断。

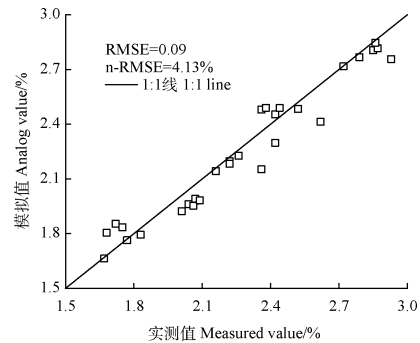


图4 基于2018年试验数据的临界氮稀释曲线模型验证
Fig.4 Validation of critical nitrogen dilution curves with data from experiments in 2018

2.3 氮营养指数动态变化

如图 5 所示, NNI 随施氮量的增加而增加。TC19 和 ND19 的 NNI 值范围为 0.53~1.34 和 0.75~1.30。从整体上看, NNI 在 N3 处理大约为 1, 这表明作物氮素营养对于玉米的生长是最佳的。NNI 值对 N0、N1 和 N2 处理的 NNI 均低于 1, 这表明玉米生长受到氮的限制。NNI 值对 N4 和 N5 处理高于 1, 表明氮素营养过盛。结果证实, 氮营养指数可以准确定量地评估不同氮素水平下滴灌玉米的植株氮状况。

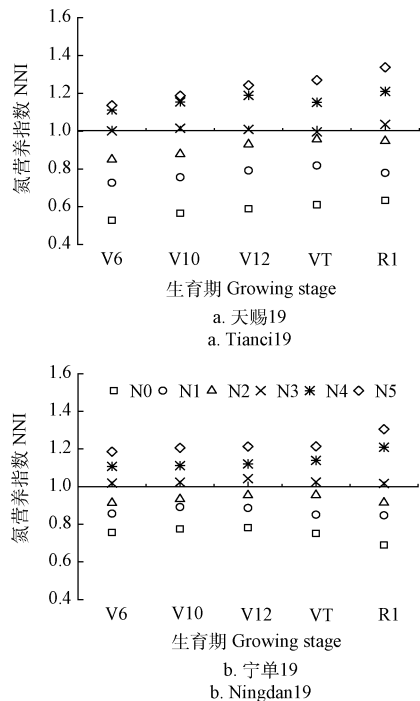


图5 2017年不同施氮量下玉米氮营养指数动态变化

Fig.5 Dynamic changes of nitrogen nutrition index of maize under different nitrogen application rates in 2017

2.4 非限氮条件下植株临界氮吸收,干物质和叶面积指数之间的关系

在非限氮生长条件下,玉米 V6 至 R1 生长阶段 LAI 与 PDM 的异速生长关系显著(图 6, k 为 1.10, c 为 0.75)。图 6b 揭示了在非限氮生长条件下,营养生长期间 N_{uc} 和 LAI 之间的异速生长关系显著,其中, 22.14 kg/hm^2 代表非限氮处理下,单位叶面积指数增长所需的植株最少吸收氮量。

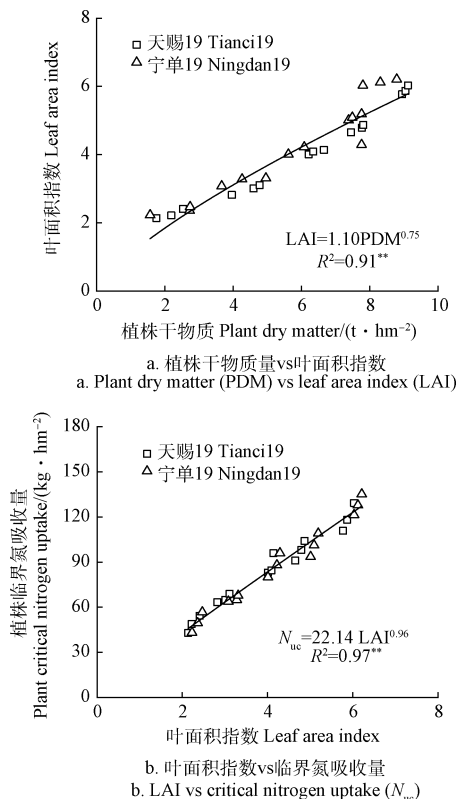


图 6 非限氮条件下植株临界氮吸收量,植株干物质和叶面积指数的异速生长关系

Fig.6 Allometric growth relationship between critical nitrogen uptake, plant dry matter and leaf area index under non-limited nitrogen conditions

3 讨论

3.1 与其他临界氮稀释曲线比较

以 PDM 为基础确定的临界氮稀释曲线已被用于各种作物,然而发现区域差异也会影响临界氮稀释曲线的适用性。LAI 是植物光合作用、呼吸作用和蒸腾作用等生物和物理过程的重要描述参数,用于评价农作物健康状况、养分供应和产量水平^[21-22]。本研究表明,在滴灌玉米营养生长阶段,随着 LAI 的增加 PNC 呈下降趋势,造成这种现象的原因主要是由于植株的老化,并且也与作物生长的物候现象有关^[23]。氮浓度稀释现象产生归因于 2 个过程:1) 相对于叶片面积,植株将更多的干物质投入到结构组分中,使植株捕捉更多的光能^[19]。2) 遮荫降低叶片单位叶面积含氮量,这与光照分配相关的氮分布优化相对应,从而优化冠层光合作用^[28]。本研究采用滴灌水肥一体化的施肥栽培模式,构建并验证了宁夏引黄灌区基于 LAI 的滴灌玉米 N_c 稀释曲线经验模型 ($N_c =$

$3.99 \text{ LAI}^{-0.45}$)。从数学角度来讲,参数 a 代表当 LAI 为 1 时的临界氮浓度值,前人在玉米的研究中(图 7a),确定其 a 值介于 2.25 ~ 3.45 之间,而参数 b 描述了植株氮浓度随作物生长的下降速率,其值在 -0.22 ~ -0.37 之间^[2,15,17-18]。本研究中基于 LAI 确定的 N_c 稀释曲线模型系数 a 和系数 b (3.99 和 -0.45) 与之前的报道中基于 PDM (图 7a) 确定的曲线系数存在轻微差异^[2,15,17-18]。显然,基于 LAI 的 N_c 稀释曲线参数高于基于 PDM 的曲线参数,这主要是由于玉米植株在生育早期积累的 LAI 高于 PDM。然而,随着玉米生育进程的推进,由于叶片的相互遮荫以及叶面积比和叶/茎比的变化,导致利用 PDM 确定的 N_c 曲线氮浓度值较低^[19]。

本研究利用 LAI 确定了宁夏灌区滴灌玉米营养生长期临界氮浓度稀释曲线模型,其模型在形式上与 Zhao 等^[29]针对华北平原建立的玉米临界氮浓度稀释模型一致,采样时间(拔节期至吐丝期)与 Zhao 等^[29]取样时间大致相同,这说明模型的构建与玉米的生育期无明显的关系,所得模型参数 b 值与 Zhao 等^[29]所建参数 b 值相同,但参数 a 值 (3.99) 高于 Zhao 等^[29]研究结果 (3.84),说明宁夏滴灌玉米植株的氮素吸收能力比新乡和沁阳的玉米氮吸收能力强,其原因主要是由于宁夏玉米采用滴灌水肥一体化施肥方式,将肥料溶入水中,每个生育时期都会满足玉米对水分和养分的需求,这与 Zhao 等^[29]基施 50% 和拔节期追施 50% 施入方式不同,说明玉米对氮素的吸收能力受施肥方式的影响。

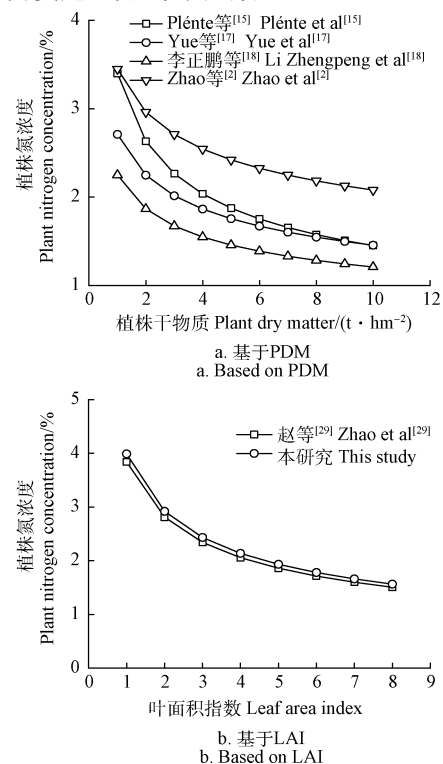


图 7 基于 PDM 和基于 LAI 的临界氮稀释曲线的比较

Fig.7 Comparison of critical nitrogen dilution curves based on PDM and LAI

3.2 基于 N_c 曲线的氮营养诊断

NNI 是实时诊断植株氮营养状况的农学指标^[19]。本研究根据 N_c 稀释曲线确定了玉米不同生长阶段的 NNI,

发现基于 N_c 稀释曲线推算的NNI可用于评价滴灌玉米的氮素营养状况,这一结论与前人在其他作物上的研究结果相似^[21-22]。不同生长阶段玉米植株NNI随施氮水平的提高而上升,其NNI值在0.53~1.34之间变化,本研究初步认为,在宁夏引黄灌区近年来推广的密植高产全程机械化栽培模式中,滴灌玉米的适宜施氮量介于270 kg/hm²左右,LAI的增大需要吸收适宜的氮肥,则该施氮量有助于作物利用氮素营养。同时,玉米LAI随着施氮水平的提高而增加,其中施氮量为270 kg/hm²可促进滴灌玉米植株对氮素营养的吸收利用,尽管N4和N5处理的LAI较高,但与N3处理相比,LAI基本维持在一个统计学意义上相等的范围内,从而导致过多的氮储存在植株中,造成氮奢侈浪费。这一结果说明玉米植株对氮的容纳有一定限度,高于临界氮吸收量后增施氮肥不仅不能提高作物LAI,还会抑制植株对氮的吸收利用。通常研究认为植株NNI在1左右比较适宜,而就法国种植的向日葵而言,当NNI达到0.8时就可以获得最大产量,因此适当的减少植物体内的氮素营养状况有利于改善植株的生长,提高作物的产量^[30]。

Lemaire和Gastal^[31]利用NNI来评价不同施氮水平下作物产量的变化,研究表明利用确定的 N_c 曲线作为玉米生产中优化施氮量的工具十分重要。同时将 N_c 曲线与遥感技术相结合,可以在区域水平上对玉米氮素状况做出较准确的诊断,也可在时间和空间分布上重合,从而获得更精确的作物氮状态时空动态信息。为了更好地发展精准农业,今后需要通过多年试验,构建并验证不同环境条件下的作物 N_c 稀释曲线,特别是磷、钾与氮素互作条件下的作物 N_c 稀释曲线。

3.3 LAI、PDM和临界氮吸收之间的异速生长关系

本研究表明,在受氮素制约的条件下,LAI与PDM积累之间的异速生长关系显著,其关系式可描述为 $LAI=1.10PDM^{0.75}$ (图6a),这证实了氮亏缺对叶面积增大和植株干物质累积之间的定量生长关系没有受到明显的影响。在玉米拔节期之前,植株个体小且相互独立,叶面积指数小,遮蔽程度低,作物对水肥光等资源的利用量不存在明显的竞争。然而,拔节期至吐丝期是玉米氮素吸收最快的生长阶段,此阶段植株个体迅速生长,玉米群体冠层结构向密闭状态形成,不同植株个体之间对水肥光等资源的竞争向三维空间分布,从而有利于叶片吸收光能^[23]。因此,本研究确定的参数 c 值(0.75)小于1,但该值略高于前人提出的理论值(2/3)^[23],由此表明玉米植株的生长是等距的。如果将理论值代入式(8),则基于LAI的 N_c 曲线的理论值为-0.5,接近本研究中确定值(-0.45)。本研究验证了前人提出的理论假设^[23],则基于LAI和PDM之间的异速生长关系在作物物种和环境具有一个通用值。本研究另外表明,在受氮素制约的条件下,本研究中参数 k 值(1.10)小于Plénet等^[15]的确定值(1.23)。这一差异可能与取样时间有关,Plénet等^[15]从苗期开始测定PDM和LAI数据,而本试验从拔节期开始测定,从而导致PDM和LAI略低。前人研究表明,作物冠层内部固有叶片数量与遮荫水平呈正相

关^[32]。玉米拔节期的遮荫效果明显高于苗期,因此本研究叶片特征参数小于Plénet等^[15]所确定的参数值。

在受氮素制约的条件下,LAI和 N_{uc} 之间的异速生长关系显著,其关系式可描述为 $N_{uc}=22.14LAI^{0.96}$ (图6b),式中参数 e 代表植株固有的临界氮吸收量,其被定义为LAI为1时的临界氮吸收量。本研究中 N_{uc} 是基于PDM的 N_c 稀释曲线确定的,其代表作物最大生长所需的最低植株临界氮吸收量。在受氮素制约的条件下,植株在其生长过程中存在氮奢侈消耗现象。因此,本研究确定的 N_{uc} 值(22.14 kg/hm²)低于Plénet等^[15]确定值(28.87 kg/hm²)。LAI的指数定义为植株吸收氮素效率与叶面积增大率之间的比值。在受氮素制约的处理下,参数 c 值(0.96)接近于1,这意味着玉米叶面积增大与植株对氮素的吸收呈显著的线性正关系。

4 结 论

本文利用2 a 6个氮水平的4个田间试验数据,构建基于叶面积指数的临界氮(N_c)稀释曲线模型,研究其在诊断宁夏引黄灌区玉米植株氮营养状况中的适应性,结果表明:

1) 玉米营养生长期 N_c 稀释曲线作为宁夏引黄灌区滴灌玉米叶面积指数(leaf area index, LAI)和植株氮浓度之间的关系模型,可以预测玉米临界氮含量,评价各生育时期玉米植株氮素营养状况。

2) 利用氮营养指数(nitrogen nutrition index, NNI)模型对玉米植株氮素营养状况进行诊断,发现2个品种施N量270 kg/hm²处理的NNI在1附近波动,因此,将施氮量270 kg/hm²作为该地区滴灌玉米施氮的参考值。

3) 在非限氮处理下,玉米植株临界氮吸收与LAI成正比,LAI与植株干物质的异速生长参数接近理论值2/3。构建的基于LAI的 N_c 稀释曲线为滴灌玉米营养生长期氮肥管理提供了一种诊断思路。

[参 考 文 献]

- [1] Miao Y, Stewart B, Zhang F. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31(2): 397—414.
- [2] Zhao B, Ata-Ul-Karim S T, Liu Z D, et al. Development of a critical nitrogen dilution curve based on leaf dry matter for summer maize[J]. *Field Crops Research*, 2017, 208: 60—68.
- [3] 付鑫, 王俊, 张祺, 等. 秸秆和地膜覆盖对渭北旱作玉米农田土壤氮组分与产量的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(19): 6912—6920.
- [4] Fu Xin, Wang Jun, Zhang Qi, et al. Effects of straw and mulch on soil nitrogen composition and yield of maize farmland under dry farming in weibei[J]. *Acta ecologica sinica*, 2018, 38(19): 6912—6920. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张凯, 刘战东, 强小嫚, 等. 耕作方式和灌水处理对冬小麦-夏玉米水分利用及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(17): 102—109.

Zhang Kai, Liu Zhandong, Qiang Xiaoman, et al. Effects of

- tillage and irrigation on water use and yield of winter wheat and summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(17): 102—109. (in Chinese with English abstract)
- [5] 漆栋良, 胡田田, 宋雪. 交替隔沟灌溉制度对制种玉米耗水规律和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 64—70.
- Qi Dongliang, Hu Tiantian, Song Xue. Effect of irrigation regime on water consumption pattern and grain yield of seed maize under partial root zone irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(14): 64—70. (in Chinese with English abstract)
- [6] 于晓芳, 孙洪利, 高聚林, 等. 深松对不同耐密性春玉米增密增产调控机制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 35—46.
- Yu Xiaofang, Sun Hongli, Gao Julin, et al. Mechanism behind densification and yield increase of spring maize with different density-tolerance regulated by subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(13): 35—46. (in Chinese with English abstract)
- [7] Ata-Ul-Karim S T, Zhu Y, Liu X J, et al. Comparison of different critical nitrogen dilution curves for nitrogen diagnosis in rice[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 42679.
- [8] 张亦涛, 王洪媛, 刘申, 等. 氮肥农学效应与环境效应国际研究发展态势[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4594—4608.
- Zhang Yitao, Wang Hongyuan, Liu Shen, et al. Development trend of international research on agricultural and environmental effects of nitrogen fertilizer[J]. Acta ecologica sinica, 2016, 36(15): 4594—4608. (in Chinese with English abstract)
- [9] Li F, Miao Y X, Feng G H, et al. Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices[J]. Field Crops Research, 2014, 157: 111—123.
- [10] Zhao B, Duan A W, Ata-Ul-Karim S T, et al. Exploring new spectral bands and vegetation indices for estimating nitrogen nutrition index of summer maize[J]. European Journal of Agronomy, 2018, 93: 113—125.
- [11] 石小虎, 蔡焕杰. 基于叶片 SPAD 估算不同水氮处理下温室番茄氮营养指数[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 116—126.
- Shi Xiaohu, Cai Huanjie. Estimation of nitrogen nutrition index of greenhouse tomato under different water and nitrogen fertilizer treatments based on leaf SPAD[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(17): 116—126. (in Chinese with English abstract)
- [12] 魏鹏飞, 徐新刚, 李中元, 等. 基于无人机多光谱影像的夏玉米叶片氮含量遥感估测[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 126—133.
- Wei Pengfei, Xu Xingang, Li Zhongyuan, et al. Remote sensing estimation of nitrogen content in summer maize leaves based on multispectral images of UAV[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(8): 126—133. (in Chinese with English abstract)
- [13] Ata-Ul-Karim S T, Yao X, Liu X J, et al. Development of critical nitrogen dilution curve of Japonica rice in Yangtze River Reaches[J]. Field Crops Research, 2013, 149: 149—158.
- [14] Greenwood D J, Gastal F, Lemaire G, et al. Growth rate and %N of field grown crops: Theory and experiments [J]. Annals of Botany, 1991, 67(2): 181—190.
- [15] Plénet D, Lemaire G. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration[J]. Plant and Soil, 2000, 216(1/2): 65—82.
- [16] Herrmann A, Taube F. The range of the critical nitrogen dilution curve for maize (*Zea mays* L.) can be extended until silage maturity[J]. Agronomy Journal, 2004, 96(4): 1131—1138.
- [17] Yue S C, Sun F L, Meng Q F, et al. Validation of a critical nitrogen curve for summer maize in the North China Plain[J]. Pedosphere, 2014, 24(1): 76—83.
- [18] 李正鹏, 宋明丹, 冯浩. 关中地区玉米临界氮浓度稀释曲线的建立和验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 135—141.
- Li Zhengpeng, Song Mingdan, Feng Hao. Establishment and validation of maize critical nitrogen concentration dilution curve in guanzhong area [J]. Chinese Journal of Agricultural Engineering, 2015, 31(13): 135—141. (in Chinese with English abstract)
- [19] Lemaire G, Marie-Helene J, Grancois F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management [J]. European Journal of Agronomy. 2008, 28(4): 614—624.
- [20] Fitzgerald G, Rodriguez D, O' Leary G. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index—the canopy chlorophyll content index (CCCI) [J]. Field Crops Research, 2010, 116: 318—324.
- [21] Zhao B, Yao X, Tian Y C, et al. New critical nitrogen curve based on leaf area index for winter wheat[J]. Agronomy Journal, 2014, 106: 379—389.
- [22] Ata-Ul-Karim S T, Zhu Y, Yao X, et al. Determination of critical nitrogen dilution curve based on leaf area index in rice[J]. Field Crops Research. 2014, 167: 76—85.
- [23] Lemaire G, Oosterom E V, Sheehy J, et al. Is crop demand more closely related to dry matter accumulation or leaf area expansion during vegetative growth[J]. Field Crops Research. 2007, 100: 91—106.
- [24] Justes E, Mary B, Meynard JM, et al. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops[J]. Annals of Botany (London), 1994, 74(4): 397—407.
- [25] Willmott C J. Some comments on the evaluation of model performance[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1982, 63(11): 1309—1313.
- [26] Yang J, Greenwood D J, Rowell D L, et al. Statistical methods for evaluating a crop nitrogen simulation model, N-ABLE[J]. Agricultural Systems, 2000, 64(1): 37—53.
- [27] Jamieson P D, Porter J R, Wilson D R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in

- New Zealand[J]. Field Crops Research, 1991, 27(4): 337—350.
- [28] Zhao B, Ata-Ul-Karim S T, Liu Z D, et al. Simple assessment of nitrogen nutrition index in summer maize by using chlorophyll meter readings[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9(11):1—13.
- [29] Zhao B, Ata-Ul-Karim S T, Duan A W, et al. Determination of critical nitrogen concentration and dilution curve based on leaf area index for summer maize [J]. Field Crops Research, 2018, 228:195—203.
- [30] Debaeke P, Oosterom E J V, Justes E, et al. A species-specific critical nitrogen dilution curve for sunflower (*helianthus annuus L.*)[J]. Field Crops Research, 2012,136(5):76—84.
- [31] Lemaire G, Gastal F. N Uptake and distribution in plant canopies[M]//Lemaire G. Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops. Germany: Springer, 1997:25—28.
- [32] Song K S, Korea F R I, Ju J, et al. Characteristics of photosynthesis and leaf growth of peucedanum japonicum by leaf mold and shading level in forest farming[J]. Korean Journal of Medicinal Crop Science, 2015, 23 (1): 43—48.

Critical nitrogen dilution curve of drip-irrigated maize at vegetative growth stage based on leaf area index

Jia Biao, Fu Jiangpeng

(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Nitrogen is a main nutrient element for crop growth but the appropriate nitrogen application and management is important in the Yellow River Irrigation Area of Ningxia. So, an effective method of accurate nitrogen assessment for maize is urgently needed in this area. In this study, based on leaf area index (LAI) of maize under drip-irrigated system, a critical nitrogen dilution curve model was established and its applicability for nitrogen management was assessed. The feasibility of diagnosing nitrogen nutrition status of maize under a water and fertilizer drip-integrated mode by using nitrogen nutrition index (NNI) was also evaluated. Six nitrogen application rates with three replicates each were designed including 0 (N0)、90 (N90)、180 (N180)、270 (N270)、360 (N360), and 450 (N450) kg/hm² in 2017 and 2018. The LAI, dry matter and nitrogen concentration were determined at jointing stage, trumpet stage, large trumpet stage, tasseling stage, and silking stage, respectively. Then, the quantitative relationship between LAI and plant nitrogen concentration (PNC) were analyzed. Moreover, the critical nitrogen dilution curve model based on LAI was constructed and verified after analysis of above-ground biomass accumulation and plant nitrogen concentration of maize from jointing stage to silking stage under different nitrogen application rates. The critical nitrogen dilution curve model was employed to reveal the effects of nitrogen application rates on NNI of maize at different growth stages. A theoretical framework was established to reveal the relationship between LAI and plant dry matter (PDM) curves and to compare the differences between critical nitrogen curve based on LAI and that based on PDM. The results showed that, as a whole, both LAI and plant nitrogen concentration were increased as nitrogen application rate increased. However, they increased with two distinct periods, which could be classified into nitrogen limitation and nitrogen non-limitation periods. The relationship between critical nitrogen and LAI conformed to a power function model at the vegetative growth stage of maize. Meanwhile, the root mean square error (RMSE) and normalized root mean square error (n-RMSE) of this established model were 0.09 and 4.13%, respectively. It indicated this model presented a good stability to predict critical nitrogen concentration of maize as well as to evaluate plant nitrogen nutrient at the vegetative growth stage. Furthermore, the NNI increased from 0.53 to 1.34 when the nitrogen fertilizer application rate increased at different growth stages. Hence, NNI could accurately reflect the nitrogen nutrition status of maize, and 270 kg/hm² was the best application rate of nitrogen in this study. In addition, under non-limited nitrogen condition, the nitrogen absorption of maize plants presented a positive correlation with LAI and the allometric growth parameters of LAI and PDM were closer to two thirds of the theoretical value. In conclusion, the established critical nitrogen curve based on LAI can effectively identify the nitrogen condition required by the plant from the jointing stage to the silking stage. The critical nitrogen curve based on leaf area index provides an effective evaluation method for precise nitrogen management of maize under drip-irrigated system in Ningxia.

Keywords: nitrogen; diagnosis; water and fertilizer integration under drip-irrigated; maize; critical nitrogen dilution curve; leaf area index; nitrogen nutrition index