

基于叶面积指数的夏玉米叶片临界氮浓度稀释曲线研究

陆军胜 耿晨鸣 崔晓路 李梦月 胡田田

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为构建基于叶面积指数(LAI)的夏玉米叶片临界氮浓度稀释曲线,于2018、2019年在关中地区进行了不同水氮供应的田间试验,试验设置了3个水分水平:雨养(RF)、亏缺灌溉(DI)和充分灌溉(FI),4个氮肥水平:0、90、150、210 kg/hm²,研究基于LAI的夏玉米叶片临界氮浓度稀释曲线对不同水分供应的响应,分析氮营养指数(NNI)与相对产量的定量关系。结果表明:夏玉米LAI与叶片氮浓度之间符合幂函数关系。基于LAI的叶片临界氮浓度稀释曲线在RF处理下年际差异显著($P < 0.05$),但在DI和FI处理下年际差异不显著($P > 0.05$)。在RF处理下基于LAI的叶片临界氮浓度稀释曲线的稀释速率显著高于DI和FI处理($P < 0.05$),但DI和FI处理间无显著差异($P > 0.05$)。将DI和FI处理的临界氮稀释曲线并置拟合,得到灌溉处理下基于LAI统一的叶片临界氮浓度稀释曲线($R^2 = 0.90, P < 0.01$)。在试验施氮量区间,氮营养指数NNI随施氮量的增加而增加,变化范围为0.62~1.16。当NNI大于等于0.97时,夏玉米产量不再随NNI的增加而增加,此时RF处理的产量为最大产量的85%,DI和FI处理的产量均高于最大产量的99%。因此,该地区推荐的水肥一体化水氮用量为灌水75% ET_c(ET_c为夏玉米需水量)和施氮150 kg/hm²。

关键词: 夏玉米; 临界氮浓度; 水肥一体化; 叶面积指数; 氮营养指数

中图分类号: S365; S275.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)04-0319-08

OSID:



Determination of Summer Maize Leaf Critical Nitrogen Dilution Curve Based on Leaf Area Index

LU Junsheng GENG Chenming CUI Xiaolu LI Mengyue HU Tiantian

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The critical nitrogen dilution curve can be used to diagnose crop nitrogen nutrition. In order to construct the leaf critical nitrogen concentration dilution curve of summer maize based on LAI, the field experiments with different water and nitrogen applications were carried out in Guanzhong Plain from 2018 to 2019. Three water levels (rain fed (RF), deficit irrigation (DI) and full irrigation (FI)) and four nitrogen levels (0 kg/hm², 90 kg/hm², 150 kg/hm² and 210 kg/hm²) were set to study the response of leaf critical nitrogen dilution curve based on LAI to different water levels. The quantitative relationship between nitrogen nutrition index (NNI) and relative yield was analyzed. The results showed that the relationship between LAI and leaf nitrogen concentration was power function. The leaf critical nitrogen dilution curve based on LAI under RF was significantly affected by the interannual variation ($P < 0.05$), while the leaf critical nitrogen dilution curve based on LAI under DI and FI was not significantly affected by the interannual variation ($P > 0.05$). The dilution rate of leaf critical nitrogen dilution curve based on LAI under RF was significantly higher than that under DI and FI ($P < 0.05$), but there were no significant difference between DI and FI ($P > 0.05$). The critical nitrogen dilution curves of DI and FI treatments were fitted, and a unified critical nitrogen dilution curve was obtained ($R^2 = 0.90, P < 0.01$). In the range of nitrogen application, NNI was increased with the increase of nitrogen application, and the range was 0.62~1.16. The relative yield of RF treatment was 85% of the maximum yield, and

收稿日期: 2020-06-26 修回日期: 2020-07-24

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503124)

作者简介: 陆军胜(1993—),男,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: 18393812768@163.com

通信作者: 胡田田(1966—),女,教授,博士生导师,主要从事农业节水理论与技术研究,E-mail: hutiant@nwsuaf.edu.cn

that of DI and FI treatment was over 99% of the maximum yield. Therefore, 75% ET_c (ET_c is the water demand of summer maize) and 150 kg/hm^2 of nitrogen were recommended for fertigation in Guanzhong Plain. This results can provide reference for the precise management of water and nitrogen of summer maize in Guanzhong Plain.

Key words: summer maize; critical nitrogen concentration; fertigation; leaf area index; nitrogen nutrition index

0 引言

氮元素是影响作物生长发育和产量形成的主要营养元素之一,对粮食增产发挥了巨大作用^[1]。但是,为了获得高产,农民常年不合理地施入大量氮肥,使氮肥利用效率低下,并导致环境污染^[2-4]。因此,及时准确地诊断作物氮素营养状况、进而调整氮肥用量显得尤为重要。

关中地区是我国夏玉米的主要产区,在农业生产中大水大肥现象非常突出^[5]。氮营养指数是目前作物氮素诊断的主要方法之一^[6],应用该方法的前提是构建临界氮浓度稀释曲线。现有临界氮浓度稀释曲线主要基于植株或者叶片的干物质累积量^[7],干物质累积量的测定需要进行田间采样,其过程费时耗力^[6]。近年来,随着科学技术的进步,叶面积指数(LAI)的获取相较于干物质累积量获取更为便捷,这为基于 LAI 的植株临界氮浓度稀释曲线进行氮营养诊断提供了便利^[8]。基于 LAI 的植株临界氮浓度稀释曲线已经在小麦^[9]、水稻^[4]和玉米^[8]等作物中构建,并且获得了较好的诊断效果。以往基于干物质或者 LAI 的植株临界氮浓度稀释曲线的研究重点关注整株玉米氮浓度^[10-13]。但相关研究表明,相较于植株整体,叶片对氮素的反应更为敏感^[14],因此利用叶片氮浓度进行作物氮素营养诊断优于利用植株全株氮浓度。目前,基于 LAI 的叶

片临界氮浓度稀释曲线研究尚未见报道。关中地区为半湿润易旱区,季节性干旱主要发生在夏玉米需水关键期(7—8月),这严重影响了夏玉米的高产、稳产^[15-18]。相关研究指出,不同水分状况下临界氮浓度稀释曲线之间存在显著差异。因此,本研究构建不同水分条件下基于 LAI 的叶片临界氮浓度稀释曲线,分析基于 LAI 的叶片临界氮浓度稀释曲线构建的氮营养指数在评估作物氮营养状况中的可靠性,为关中地区夏玉米氮素的田间管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2018、2019年6—9月在西北农林科技大学节水灌溉试验站($34^{\circ}17'24''\text{N}$, $108^{\circ}4'5''\text{E}$,海拔506 m)进行。试验区属于暖温带季风半湿润气候区,年平均温度 12.9°C ,年平均蒸发量 $1\,500\text{ mm}$ ^[19]。2018、2019年夏玉米生育期内降雨量分别为434、522 mm(图1)。试验区土壤质地为重壤土,0~100 cm 土层的田间持水率为23%~25%(质量含水率,下同),凋萎含水率为8.5%,0~20 cm 土层的土壤 pH 值为8.14,有机质含量(质量比,下同)为12.02 g/kg,土壤硝态氮含量为10.08 mg/kg,铵态氮含量为6.94 mg/kg,速效磷含量为20.47 mg/kg,速效钾含量为164.5 mg/kg。

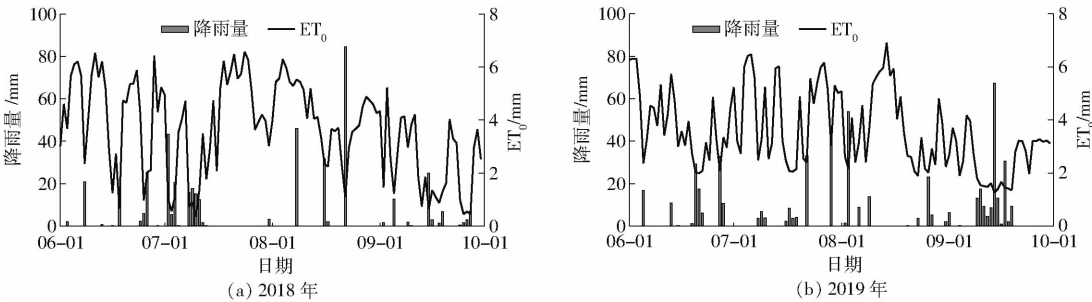


图1 2018年和2019年夏玉米生育期内降雨量和参考作物潜在蒸发蒸腾量(ET_0)

Fig. 1 Precipitation and reference crops evapotranspiration (ET_0) during summer maize growth period in 2018 and 2019

供试品种为当地主栽品种“郑单958”,在冬小麦收获后分别于2018年6月10日和2019年6月9日播种(硬茬播种),2018、2019年均于9月25日收获,全生育期约108 d,为了保证出苗,播种时每穴播种2粒种子,出苗后每穴保留一株。滴灌所用肥料

为尿素,施肥比例分别为出苗20%、六叶期30%、十四叶期30%、吐丝期20%。全生育期施入磷肥(P_2O_5) 90 kg/hm^2 、钾肥(K_2O) 60 kg/hm^2 。滴灌施肥系统主要由水泵、比例施肥泵、过滤器、水表及输配水管道系统及滴灌带组成。试验小区长7 m,宽

3.6 m。每个小区布置 6 根滴灌带,滴灌带间距 60 cm,采用 $\Phi 16$ 内镶式滴灌带,滴头间距 30 cm,工作压力为 0.1 MPa,滴头流量为 2 L/h,每个小区有一个单独的控制阀门可以对试验小区进行单独控制操作。夏玉米种植行距 60 cm,株距 23.5 cm,播种密度 70 922 株/hm²。

1.2 试验设计

试验设灌水量和施氮量两因素,灌水量设置 3 个水平:雨养(RF)、亏缺灌溉(75% ET_c,FI)、充分灌溉(100% ET_c,FI)。施氮量设置 4 个水平:不施氮肥(NN)和 90 kg/hm²(N3)、150 kg/hm²(N2)、210 kg/hm²(N1)纯氮。试验采用裂区设计,水分处理为主区,施氮量为副区,共 12 个处理,每个处理重复 3 次。

灌水量依据 P-M 公式计算^[20],当夏玉米 ET_c 累计达到 30 mm 且未来 3 d 无预报降雨时进行灌溉(图 1),2018 年分别在 7 月 21 日、7 月 26 日、8 月 2 日和 8 月 29 日灌溉,2019 年分别在 7 月 13 日、8 月 14 日和 8 月 19 日灌溉。夏玉米生育期内参考作物蒸发蒸腾量(ET₀)如图 1 所示,作物系数根据作物生育阶段而定,苗期取 0.6、拔节-灌浆期取 1.2、乳熟-成熟期取 0.6。

1.3 叶面积指数、叶片氮含量及产量测定

于夏玉米苗期-灌浆期,每个小区选取 3 株长势一致的夏玉米,分别测定夏玉米叶面积,采用长宽系数法计算叶面积指数(LAI)。测定叶面积后将夏玉米叶片带回实验室 105℃ 杀青 30 min,75℃ 干燥至质量恒定。随后将夏玉米叶片粉碎,过 1 mm 筛,用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,并用流动分析仪(Auto Analyzer-Ⅲ型,德国 Bran Luebbe 公司)测定叶片全氮含量。在成熟期,随机选取 2 行夏玉米,连续取 10 株,每个小区重复 3 次,晒干脱粒后称量,折算成含水率为 14% 的籽粒产量^[21]。相对产量为各处理产量与当年最高产量的比值。

1.4 临界氮浓度模型建立及氮营养指数

依据临界氮浓度的定义及计算方法^[22-23],模型的建立步骤主要包括:①方差分析每次取样的 LAI 和叶片氮浓度(LNC)有无显著差异,将其分为非限氮组和限氮组。②线性拟合限氮组 LAI 和 LNC 数据。③求非限氮组 LAI 的平均值,并构建垂直线。④利用每个采样时期限氮组斜线与非限氮组垂线的交点坐标确定临界氮浓度。基于 LAI 构建的叶片临界氮浓度稀释曲线效应方程为

$$N_c = aLAI^{-b} \tag{1}$$

式中 N_c ——夏玉米叶片临界氮浓度(质量比),g/kg
 LAI ——叶面积指数,cm²/cm²

a 、 b ——模型参数
将各处理试验实测的 LNC 除以临界氮浓度确定每个采样时期的氮营养指数(NNI),计算公式为

$$NNI = LNC / N_c \tag{2}$$

式中 LNC ——实测叶片氮浓度(质量比),g/kg
当 NNI 等于 1 时,夏玉米氮状态最佳,当 NNI 大于 1 时,表示氮过量,当 NNI 小于 1 时,表示夏玉米氮不足^[7]。

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 软件进行数据处理与计算,采用 SPSS 21.0 软件进行单因素方差分析和多重比较,采用 SigmaPlot 12.5 软件进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 不同水氮处理对夏玉米叶面积指数和叶片氮浓度的影响

随着夏玉米生育期的推进(苗期-灌浆期),LAI 呈现快速增加-缓慢增加-略有下降的变化趋势(图 2)。与雨养处理相比,灌水能够显著增加夏玉米 LAI,但亏缺灌溉和充分灌溉处理之间 LAI 无显著差异($P > 0.05$)。氮肥用量显著影响夏玉米 LAI,在施氮量 0~150 kg/hm² 范围内,LAI 随施氮量的增加而显著增加。当施氮量超过 150 kg/hm² 时,夏玉米 LAI 不再随施氮量的增加而显著增加。

夏玉米 LNC 随着生育期的推进逐渐降低,雨养处理的 LNC 略微低于灌溉处理,亏缺灌溉和充分灌溉处理下 LNC 之间无明显差异(图 3)。施氮能够显著增加 LNC,在施氮量 0~150 kg/hm² 范围内,LNC 随着施氮量的增加而增加。当施氮量超过 150 kg/hm² 时,LNC 不再显著增加,即 N1 和 N2 处理之间 LNC 无显著差异($P > 0.05$)。

2.2 夏玉米叶片临界氮浓度稀释曲线构建

依据临界氮浓度稀释曲线的定义,基于 LAI 的叶片临界氮浓度为两条直线的交点:其中一条为限氮处理(NN 和 N3) LNC 随 LAI 增加而增加的倾斜直线,另外一条为非限氮处理(N2 和 N1) LAI 平均值为横坐标的垂直线,两直线的交点即为该生育期夏玉米叶片的临界氮浓度。不同水分处理下基于夏玉米 LAI 的叶片临界氮浓度稀释曲线如图 4(图中 ** 表示差异极显著($P < 0.01$),* 表示差异显著($P < 0.05$))所示。由图可知,LNC 随着 LAI 的增加呈下降的趋势,其变化过程可以通过幂函数方程拟合。在临界氮浓度稀释曲线模型中,雨养、亏缺灌溉和充分灌溉处理的幂函数拟合参数 a 在 2018 年分别为 35.14、36.37 和 35.62,在 2019 年分别为 33.92、34.83 和 37.21;参数 b 在 2018 年分别为

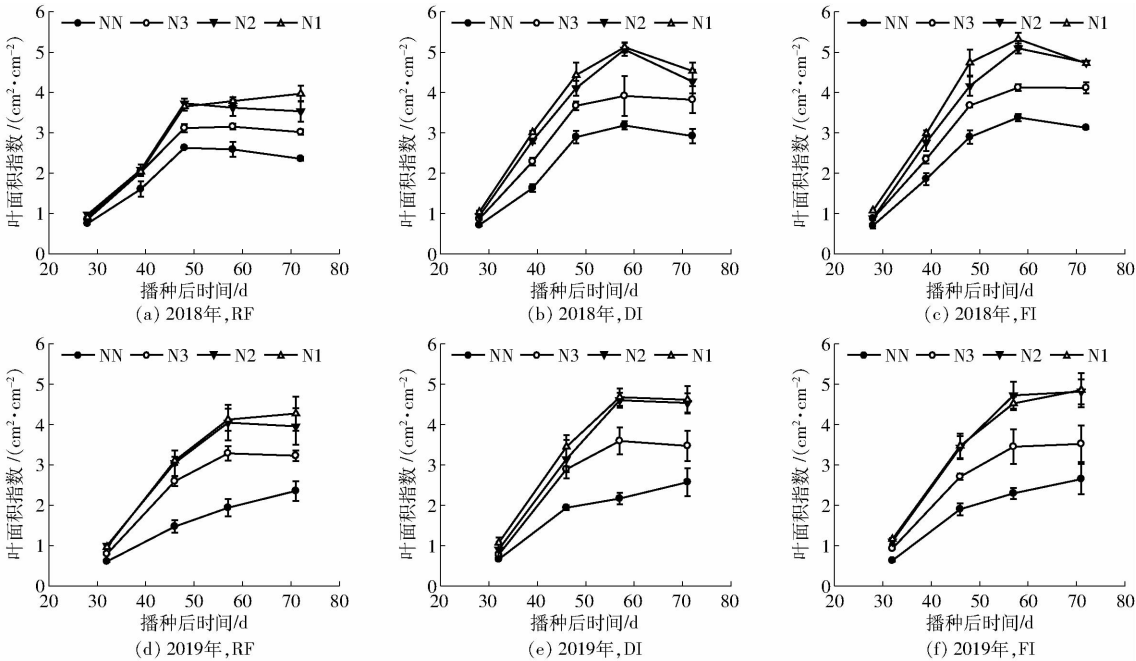


图2 不同水氮处理对夏玉米叶面积指数的影响

Fig.2 Effect of different water and nitrogen treatments on leaf area index of summer maize

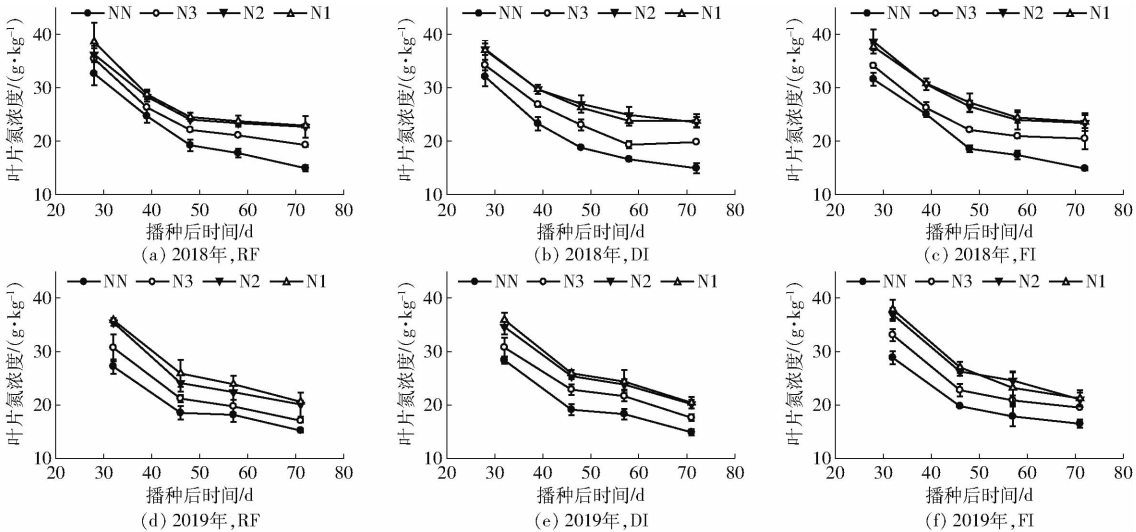


图3 不同水氮处理对夏玉米叶片氮浓度的影响

Fig.3 Effect of different water and nitrogen treatments on leaf nitrogen concentration of summer maize

0.29、0.25 和 0.22, 在 2019 年分别为 0.38、0.29 和 0.29。雨养处理的参数 a 低于灌溉处理, 而参数 b 高于灌溉处理。

为进一步分析拟合方程参数在各水分处理之间的差异, 将幂函数模型进行直线化处理, 即 $\ln N_c = \ln a - b \ln LAI$ 。采用协方差分析方法, 分别分析了 RF、DI 和 FI 处理之间斜率和截距间的差异。结果表明, 在 2018 年各水分处理之间的拟合方程斜率和截距无显著差异; 在 2019 年各水分处理之间斜率无显著差异, 但 RF 处理直线化方程的截距显著低于 DI ($P = 0.049$) 和 FI ($P = 0.002$), DI 和 FI 处理之间截距差异不显著 ($P > 0.05$)。这说明 2019 年基于 LAI 的叶片临界氮浓度稀释曲线在 RF 处理下的下

降速率显著高于 DI 和 FI 处理。此外, 还分析了不同水分处理下基于 LAI 的叶片临界氮浓度稀释曲线在 2018 年和 2019 年的差异, 结果表明 RF 处理 2018 年和 2019 年直线化方程的截距存在显著差异 ($P = 0.018$), 其他水分处理下的截距和斜率均无显著差异 ($P > 0.05$)。这说明 RF 处理下基于 LAI 的叶片临界氮稀释曲线更容易受到年际影响, 而灌溉处理下基于 LAI 的临界氮浓度稀释曲线较为稳定。因此, 将 2018 年和 2019 年 DI 和 FI 处理的曲线并置拟合, 得到灌溉处理下基于 LAI 统一的临界氮浓度稀释曲线, a 为 35.91, b 为 0.26 (图 5)。

2.3 氮营养指数的动态变化及其与相对产量的关系

夏玉米氮营养指数 (NNI) 总体上随着施氮量的

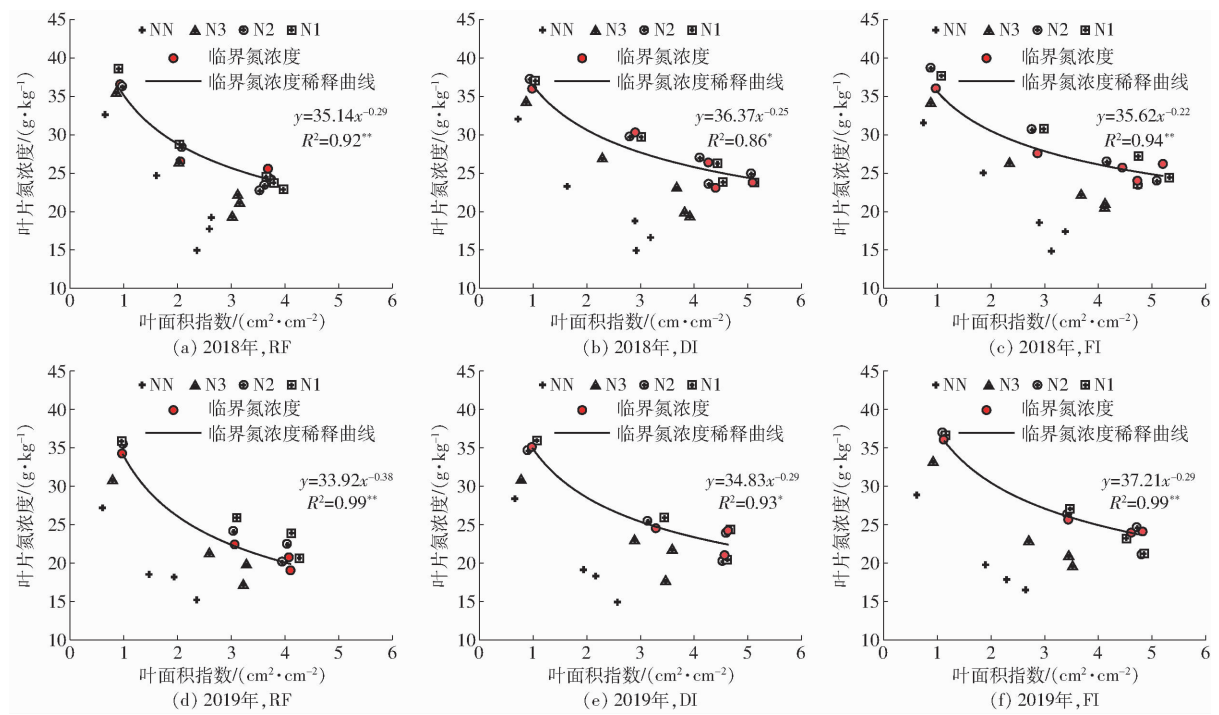


图4 基于夏玉米叶面积指数的临界氮稀释曲线

Fig. 4 Critical nitrogen dilution curves based on leaf area index of summer maize

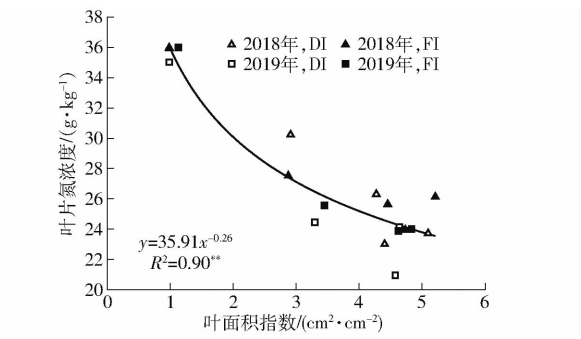


图5 灌溉处理下统一的基于夏玉米叶面积指数的临界氮稀释曲线

Fig. 5 Comprehensive critical nitrogen dilution curve based on leaf area index of summer maize under irrigation conditions

增加而增加,变化范围为 0.62 ~ 1.16(图 6)。整体上看,NN 和 N3 处理的 NNI 显著小于 1,N2 和 N1 处理的 NNI 大于或者接近于 1,N1 处理的 NNI 略微高于 N2 处理,这表明 N1 和 N2 处理能够满足夏玉米生长对氮素的需求。

夏玉米 NNI 和相对产量(各处理产量与当年最大产量的比值)之间的关系如图 7 所示。由图可知,RF 处理的相对产量较灌溉处理明显偏低,当 NNI 大于等于 0.96 时,RF 处理的产量维持稳定,为最大产量的 85%。DI 和 FI 处理之间夏玉米产量差异较小,当 NNI 大于等于 0.97 时,夏玉米的产量维持在一个相对高产的水平(DI 和 FI 处理均高于最大产量的 99%),并不随着 NNI 的增加而持续增加。因此,在水肥一体化条件下,DIN2 处理能够获得较高的夏玉米产量。

3 讨论

基于植株或叶片干物质的临界氮浓度稀释曲线已经被广泛的应用于小麦^[13,24],水稻^[25]、玉米^[3,12,26]、棉花^[11]、甜椒^[10]等作物,前人研究结果表明,作物品种、种植区域、水分供应水平及施肥方式等均会对临界氮浓度稀释曲线产生影响^[3,11,13,24,26]。然而作物干物质质量的获取耗时费力,限制了基于植株或叶片干物质的临界氮浓度稀释曲线的应用。叶片与作物光合等生物物理过程息息相关,是作物干物质累积的主要器官^[6]。叶面积指数(LAI)是植物群体参数的主要指标之一,随着叶面积指数检测仪和遥感等技术在农业上的广泛应用,LAI 的获取相较于干物质更为容易和便捷^[7]。此外,相关研究指出叶片氮浓度较植株整体氮浓度对氮素的响应更为敏感^[14]。因此,本文构建了基于 LAI 的叶片临界氮浓度稀释曲线。结果表明,随着 LAI 的增加叶片氮浓度(LNC)逐渐降低,这与植株或叶片干物质增加氮浓度降低一致^[3,26]。此外,本文还分析了基于 LAI 的叶片临界氮浓度稀释曲线对不同水分处理的响应。结果表明,雨养处理的参数 *a* 小于灌溉处理,协方差分析结果表明差异未达到显著水平($P > 0.05$),但雨养处理的参数 *b* 显著大于灌溉处理($P < 0.05$)。这说明水分差异不会对夏玉米叶片初始氮浓度造成影响,但会使得其稀释速率增加。究其原因可能是水分不足导致根系活力降低,影响夏玉米生长发育、干物质累积以及植株体的氮素吸收

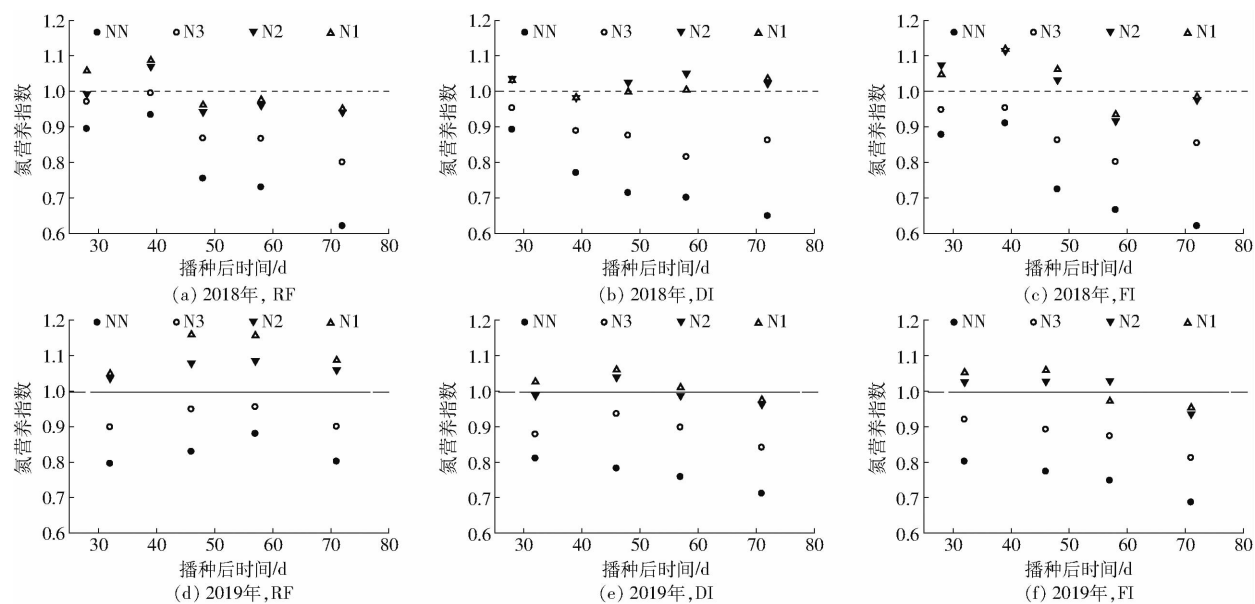


图6 不同水氮处理下夏玉米叶片氮营养指数动态变化

Fig.6 Dynamic changes of nitrogen nutrition index of summer maize leaves under different water and nitrogen treatments

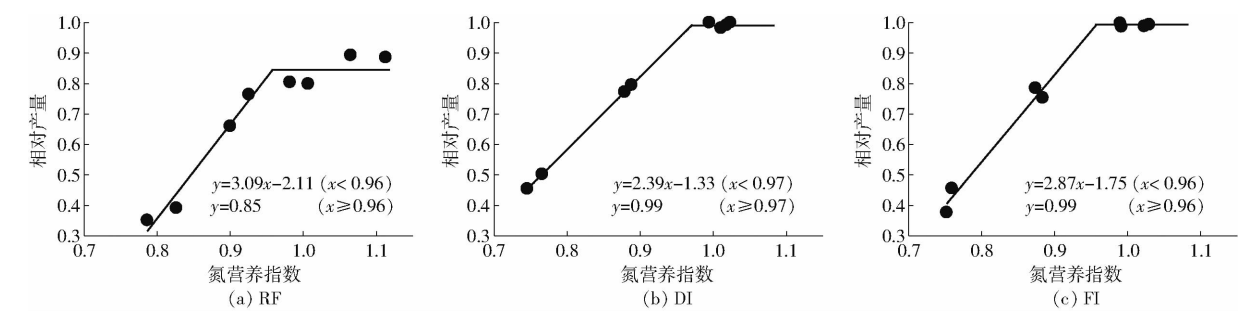


图7 夏玉米氮营养指数和相对产量的关系

Fig.7 Relationship of nitrogen nutrition index and relative yield of summer maize

过程^[27-28]。这与强生才等^[3]在关中地区的研究结果(参数 a 不受降雨年型的影响和参数 b 受降雨年型影响)一致。但向友珍等^[10]通过对不同灌溉水平下甜椒的临界氮浓度稀释曲线进行研究得出,60%ET_c灌溉水平下临界氮稀释曲线参数 a 较小,这可能是因为水分过度亏缺限制了甜椒对氮素营养的吸收,导致植株生长受到一定的抑制作用。本文通过整合灌溉处理下基于LAI的叶片临界氮浓度稀释曲线,得到水肥一体化条件下统一的基于LAI的叶片临界氮浓度稀释曲线($N_c = 35.91LAI^{-0.26}$)。由稀释曲线可知,随着LAI增加, N_c 对LAI的敏感性逐渐降低,当LAI大于 $5.8\text{ cm}^2/\text{cm}^2$ 时,LAI每增加 $0.1\text{ cm}^2/\text{cm}^2$, N_c 减少值不足 0.1 g/kg (图5)。该曲线可为灌溉条件下夏玉米氮营养诊断提供指导,也适用于夏玉米不受水分胁迫的雨养处理。

实际生产中NNI等于1难以实现,因此CILIA等^[29]将玉米NNI以 $0\sim0.7$ 、 $0.7\sim0.9$ 、 $0.9\sim1.1$ 、 $1.1\sim1.3$ 和大于1.3划分为5级,当NNI处于 $0.9\sim1.1$ 之间认为氮素处于适宜状况。本研究中N2和N1处理的NNI在苗期到灌浆期均高于0.9,

但N1处理的NNI略高于N2处理,这说明N2处理的施氮量能够满足作物正常生长需要,N1处理的施氮量略高于作物需氮量。通过NNI和相对产量的关系可以看出,雨养处理限制了作物产量,当NNI处于适宜范围内时,相对产量为最大产量的85%,而灌溉处理的相对产量高于99%的最大产量,且亏缺灌溉和充分灌溉处理之间差异较小,这说明在关中地区季节性干旱中进行补充灌溉有利于夏玉米产量的提高。

4 结论

(1)基于LAI的叶片临界氮浓度稀释曲线模型在雨养处理下受年际影响达到显著水平($P < 0.05$),在亏缺灌溉和充分灌溉处理下受年际影响不显著($P > 0.05$)。

(2)雨养处理下的临界氮浓度稀释曲线与亏缺灌溉和充分灌溉处理之间差异显著,但亏缺灌溉和充分灌溉处理之间差异不显著。灌溉处理下统一的临界氮浓度稀释曲线模型为 $N_c = 35.91LAI^{-0.26}$ ($R^2 = 0.90^{**}$),该模型可用于指导关中地区夏玉米

的灌溉、施肥,对合理适量施肥具有重要意义。

(3)夏玉米氮营养指数(NNI)随施氮量的增加而增加,变化范围介于 0.62~1.16。夏玉米相对产量随 NNI 的增加线性增加,雨养处理下当 NNI 大于等于 0.96 时,产量达到最大值并维持稳定,为各处

理最大产量的 85%,亏缺灌溉和充分灌溉下当 NNI 大于等于 0.97 时,夏玉米产量达到最大值,均高于最大产量的 99%。因此,灌水量 75% ET₀和施氮量 150 kg/hm²为关中地区水肥一体化条件下推荐的水氮用量。

参 考 文 献

[1] 朱兆良,金继运.保障我国粮食安全的肥料问题[J].植物营养与肥科学报,2013,19(2):259-273.
ZHU Zhaoliang, JIN Jiyun. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259-273. (in Chinese)

[2] 张富仓,严富来,范兴科,等.滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响[J].农业工程学报,2018,34(22):111-120.
ZHANG Fucang, YAN Fulai, FAN Xingke, et al. Effects of irrigation and fertilization levels on grain yield and water-fertilizer use efficiency of drip-fertigation spring maize in Ningxia[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 111-120. (in Chinese)

[3] 强生才,张富仓,向友珍,等.关中平原不同降雨年型夏玉米临界氮稀释曲线模拟及验证[J].农业工程学报,2015,31(17):168-175.
QIANG Shengcai, ZHANG Fucang, XIANG Youzhen, et al. Simulation and validation of critical nitrogen dilution curve for summer maize in Guanzhong Plain during different rainfall years[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17): 168-175. (in Chinese)

[4] ATA-UI-KARIM S T, ZHU Yan, LIU Xiaojun, et al. Comparison of different critical nitrogen dilution curves for nitrogen diagnosis in rice[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):42679.

[5] 张明,同延安,郭俊伟,等.陕西关中小麦/玉米轮作区氮肥用量及施氮现状评估[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,39(4):152-164.
ZHANG Ming, TONG Yan'an, GUO Junwei, et al. Determination of reasonable nitrogen use and evaluation of application status in wheat/maize rotation system in Guanzhong area of Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, 39(4): 152-164. (in Chinese)

[6] LEMAIRE G, JEUFFROY M, GASTAL F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage[J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28(4):614-624.

[7] 曹强,田兴帅,马吉锋,等.中国三大粮食作物临界氮浓度稀释曲线研究进展[J].南京农业大学学报,2020,43(3):392-402.
CAO Qiang, TIAN Xingshuai, MA Jifeng, et al. Research progress in critical nitrogen dilution curve of three main grain crops in China[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2020, 43(3): 392-402. (in Chinese)

[8] 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.
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 CSAE, 2020, 36(6): 66-73. (in Chinese)

[9] QIANG Shengcai, ZHANG Fucang, DYCK M, et al. Determination of critical nitrogen dilution curve based on leaf area index for winter wheat in the Guanzhong Plain, Northwest China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(10):2369-2380.

[10] 向友珍,张富仓,范军亮,等.基于临界氮浓度模型的光温室甜椒氮营养诊断[J].农业工程学报,2016,32(17):89-97.
XIANG Youzhen, ZHANG Fucang, FAN Junliang, et al. Nutrition diagnosis for N in bell pepper based on critical nitrogen model in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17): 89-97. (in Chinese)

[11] 马露露,吕新,张泽,等.基于临界氮浓度的滴灌棉花氮素营养诊断模型研究[J/OL].农业机械学报,2018,49(2):277-283.
MA Lulu, LÜ Xin, ZHANG Ze, et al. Establishment of nitrogen nutrition diagnosis model for drip-irrigation cotton based on critical nitrogen concentration[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 277-283. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180235&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.035. (in Chinese)

[12] 付江鹏,贾彪,杨文伟,等.基于叶片干物质的滴灌玉米临界氮稀释曲线构建[J].应用生态学报,2020,31(3):945-952.
FU Jiangpeng, JIA Biao, YANG Wenwei, et al. Development of critical nitrogen dilution curve based on leaf dry matter for maize under drip irrigation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(3): 945-952. (in Chinese)

[13] 强生才,张富仓,田建柯,等.基于叶片干物质的冬小麦临界氮稀释曲线模拟研究[J/OL].农业机械学报,2015,46(11):121-128.
QIANG Shengcai, ZHANG Fucang, TIAN Jianke, et al. Development of critical nitrogen dilution curve in winter wheat based on leaf dry matter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 121-128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151111&journal_id=jcsam

- // www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20151117&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.017. (in Chinese)
- [14] 李春俭. 高级植物营养学[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2003.
- [15] 张允, 赵景波. 近 200 年来关中地区干旱灾害时空变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(7): 94–98.
ZHANG Yun, ZHAO Jingbo. Spacial-temporal changes of drought disaster in Guanzhong area in recent 200 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(7): 94–98. (in Chinese)
- [16] 于玲玲. 陕西旱作农区旱灾发生时空规律及减灾对策研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010.
YU Lingling. Study of drounght occurrence and mitigation measures in dry-land farming area in Shannxi[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- [17] 刘闻, 曹明明, 宋进喜, 等. 陕西年降水量变化特征及周期分析[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 865–874.
LIU Wen, CAO Mingming, SONG Jinxi, et al. Spatio-temporal distribution and temporal periodicity of annual precipitation in Shaanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(5): 865–874. (in Chinese)
- [18] 李惠茹. 陕西水旱灾害探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2004, 15(3): 65–67.
LI Huiru. Discussion of drought and flood damage in Shaanxi Province[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2004, 15(3): 65–67. (in Chinese)
- [19] 闫世程, 张富仓, 吴悠, 等. 滴灌夏玉米土壤水分与蒸散量 SIMDualKc 模型估算[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 152–160.
YAN Shicheng, ZHANG Fucang, WU You, et al. Estimation of drip irrigated summer maize soil water content and evapotranspiration based on SIMDualKc model[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 152–160. (in Chinese)
- [20] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements, IRI [R]. FAO Irrigation & Drainage Paper 56, 1998.
- [21] MANSOURI-FAR C, MODARRES S S A M, SABERALI S F. Maize yield response to deficit irrigation during low-sensitive growth stages and nitrogen rate under semi-arid climatic conditions[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(1): 12–22.
- [22] JUSTES E, MARY B, MEYNARD J, et al. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops[J]. Annals of Botany, 1994, 74(4): 397–407.
- [23] GREENWOOD 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.
- [24] 李正鹏, 冯浩, 宋明丹. 关中平原冬小麦临界氮稀释曲线和氮营养指数研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 177–183, 273.
LI Zhengpeng, FENG Hao, SONG Mingdan. Critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition index of winter wheat in Guanzhong Plain[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 177–183, 273. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20151023&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.023. (in Chinese)
- [25] YAO Xia, ATA-UL-KARIM S T, ZHU Yan, et al. Development of critical nitrogen dilution curve in rice based on leaf dry matter[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 55: 20–28.
- [26] 贾彪, 付江鹏. 基于临界氮浓度的宁夏玉米氮吸收与亏缺模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 256–263.
JIA Biao, FU Jiangpeng. Nitrogen uptake and nitrogen deficit model of drip irrigation maize in Ningxia based on critical nitrogen concentration[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 256–263. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200128&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.028. (in Chinese)
- [27] 王小彬, 蔡典雄, 张镜清, 等. 旱地玉米 N 吸收及其 N 肥利用率研究[J]. 中国农业科学, 2001, 34(2): 179–186.
WANG Xiaobin, CAI Dianxiong, ZHANG Jingqing, et al. Nitrogen uptake by corn and N recovery in grain in dry farmland [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2001, 34(2): 179–186. (in Chinese)
- [28] WU Fuzhong, BAO Weikai, LI Fanglan, et al. Effects of drought stress and N supply on the growth, biomass partitioning and water-use efficiency of *Sophora davidii* seedlings[J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, 63(1–3): 248–255.
- [29] CILIA C, PANIGADA C, ROSSINI M, et al. Nitrogen status assessment for variable rate fertilization in maize through hyperspectral imagery[J]. Remote Sensing, 2014, 6(7): 6549–6565.