DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.03021

夏玉米不同部位干物质临界氮浓度稀释曲线的构建及对产量的估计

苏文楠^{1,2} 解 君² 韩 娟^{1,2} 刘铁宁^{1,2} 韩清芳^{1,2,*}

¹ 西北农林科技大学农学院 / 农业农村部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室, 陕西杨凌 712100; ² 中国旱区节水农业研究院 / 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: 准确和动态地诊断营养生长阶段植株氮状况, 对于评估植物氮需求、预测玉米产量以及优化氮素管理至关重要。基于植物的氮诊断工具可优化夏玉米生产中氮素的管理, 本研究旨在开发和验证基于玉米地上部不同部位干物质的临界氮浓度稀释曲线, 并建立玉米相对产量(relative yield, RY)与不同生长阶段氮素营养指数(nitrogen nutrition index, NNI)和累积氮素亏缺(accumulated nitrogen deficit, AND)的关系。本文以 2 个不同氮效率的品种为试验材料进行连续 4 年的田间定位试验, 设置 4 个氮素水平(0、150、225 和 300 kg hm⁻²), 分析不同施氮量对 2 个玉米品种营养生长阶段干物质的影响, 基于叶干物质(leaf dry matter, LDM)、茎干物质(stem dry matter, SDM)和植物干物质(plant dry matter, PDM), 构建不同的临界氮浓度稀释曲线。结果表明, 基于 LDM、SDM 和 PDM 建立的临界氮浓度稀释曲线, 均能很好地诊断玉米氮营养状况; 3 条临界氮浓度稀释曲线对产量进行预测比较发现, RY 与 NNI 和 AND 在不同生长阶段之间的相关性均达到显著水平, 相关系数 R^2 值均大于 0.65, 其中 R^2 值在 V12–VT 时期最大, 同时回归模型的验证结果表明, 在 V12–VT 时期模型显示出可靠性。 R^2 值大于 0.92, RMSE 值小于 10%, 证实了模型在 V12 和 VT 两个时期关系的稳定性。总的来说, 一定的条件下, 基于 LDM 和 SDM 建立的临界氮浓度稀释曲线可以对基于 PDM 建立的临界氮浓度稀释曲线进行代替。在 V12–VT 阶段, RY 与 NNI 和 AND 的稳定关系很好地说明了在受氮素限制和非氮素限制下 RY 的变化, 并对夏玉米产量进行准确的估计。本研究为花前玉米的氮肥管理提高粮食产量提供理论依据。

关键词: 临界氮浓度稀释曲线; 玉米; 氮营养指数; 累积氮素亏缺

Construction of critical nitrogen dilution curve based on dry matter in different organs of summer maize and estimation of grain yield

SU Wen-Nan^{1,2}, XIE Jun², HAN Juan^{1,2}, LIU Tie-Ning^{1,2}, and HAN Qing-Fang^{1,2,*}

¹ College of Agronomy, Northwest A & F University / Key Laboratory of Crop Physio-ecology and Tillage Science in North-western Loess Plateau, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ² Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China / Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China

Abstract: It is essential to accurate and dynamic diagnosis of plant nitrogen status at vegetative growth stage for the assessment of plant nitrogen demand and the prediction of crop yield as well as the optimization of nitrogen management in maize. Plant-based nitrogen diagnostic tool can be used to optimize nitrogen management in summer maize production. The aim of this study was to develop and verify critical nitrogen concentration dilution curves based on dry matter in different tissue of the plant, and to establish the relationship between relative yield (RY) nitrogen nutrition index (NNI), and accumulated nitrogen deficit (AND) at different growth stages in maize. We conducted a 4-year field study using four nitrogen application rates (0, 150, 225,

本研究由国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA102902), 国家公益性行业(农业)科研专项(201303104)和国家自然科学基金项目(31601256)资助。

This study was supported by the National High-Tech Research and Development Programs of China “863 Program” for the 12th Five-Year Plants (2013AA102902), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201303104), and the National Natural Science Foundation of China (31601256).

* 通信作者(Corresponding author): 韩清芳, E-mail: hanqf88@nwfau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: asuwennan@163.com

Received (收稿日期): 2020-03-26; Accepted (接受日期): 2020-10-14; Published online (网络出版日期): 2020-11-03.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20201102.1154.003.html>

and 300 kg N hm⁻²) and two maize cultivars (Zhengda 12 and Shaandan 609) to analyze the effects of nitrogen on dry matter at the vegetative growth stage, and based on leaf dry matter (LDM), stem dry matter (SDM), and plant dry matter (PDM), different critical nitrogen concentration dilution curves were developed. The results showed that the critical nitrogen concentration dilution curves based on LDM, SDM and PDM can well diagnose the nitrogen nutrition status of corn. The yield prediction results of three critical nitrogen concentration dilution curves showed that the relationship between RY and NNI, AND at different growth stages was highly significant, and the values of R^2 were all greater than 0.65, where R^2 was the largest at V12-VT, and the verification of the regression model showed reliable model performance during the V12-VT period, with R^2 values greater than 0.92 and RMSE values less than 10%, which confirmed the stability of the relationship between V12 and VT. Generally, under certain conditions, the critical nitrogen concentration dilution curve based on LDM and SDM can be used to replace the critical nitrogen concentration dilution curve based on PDM. The stable relationship between RY and NNI, RY and AND in V12-VT stage can well explain the change of RY under restricted and unrestricted nitrogen and estimate the yield of summer maize. This study provides the basis for nitrogen management of pre-anthesis to improve maize grain yield.

Keywords: critical nitrogen dilution curve; maize; nitrogen nutrition index; accumulated nitrogen deficit

氮肥对粮食增产的贡献率可达 30%~50%^[1], 就目前中国氮肥的使用现状, 继续增加氮肥投入对提高粮食产量的效果甚微, 并且降低了氮肥的利用效率。同时, 调查结果显示, 约 60%~70%的氮肥通过挥发和淋洗等途径有所损失^[2-3], 这种现象在陕西关中地区播前一次施入的施肥模式下变得更加严重。因此, 针对作物不同生育阶段精确调控氮肥施用量, 对于增加作物产量, 提高氮肥利用效率和改善环境问题具有重要战略意义^[4-5]。

进行植株氮营养状况的评估对于作物生长系统的调查、监控、管理以及产量预测至为关键。评估植株氮素营养状况的一些常用方式, 如叶绿素仪^[6]和遥感^[7], 这些方法存在地域和年际间的不稳定性, 以及成本的问题导致在评估植株氮营养状况时受到限制。临界氮浓度稀释曲线定义为最大作物生长所需的最小氮浓度^[8], 由于其在植物氮诊断中的准确性和稳定性, 已引起全世界的广泛关注。随着研究的深入, 国内外学者在构建方法 and 应用区域上对临界氮浓度稀释曲线进行拓展^[9-12]。品种的更新(氮的吸收和利用效率逐渐降低)和环境的变化以及模型软件的发展, 对临界氮浓度稀释曲线参数提出更高的要求。因此, 在不同部位干物质的基础上(而不是仅仅传统上基于植株干物质(plant dry matter, PDM))开发临界氮浓度稀释曲线, 不仅可以更好地理解这一概念, 而且有利于探清基因型和环境带来的作物氮素动态的生理功能的差异, 同时适应模型软件的发展。氮营养指数(nitrogen nutrition index, NNI)作为氮素营养诊断的重要指标, 是用于基于临界氮浓度稀释曲线的氮诊断的工具之一^[10,13-15]。NNI 这一概念可以成功地区分植株的氮素营养状况, 并且将根据这些曲线得出的诊断工具与作物模拟模型集成在一起, 以协助作物氮素管理^[13-14,16-18], 这些关系也

已用于估计作物对氮素的需求, 以促进作物生长期间的氮肥施用以及评估籽粒品质^[14]。水稻、小麦和玉米营养生长期 NNI 与相对产量(relative yield, RY)的关系已用于估算籽粒产量^[17,19-20]。作物生长阶段对于确定植物营养状况以预测玉米产量至关重要^[13,20], 确定不同作物生长阶段 NNI 与 RY 的关系将有助于更好地理解植株与氮的关系, 并有益于对作物氮的动态建模, 因此, 需要进一步调查研究不同生育阶段的 NNI 和相关氮参数是否可以预测玉米的产量。例如 NNI 和累积氮亏缺(accumulated nitrogen deficit, AND), 以量化植物中氮营养状态, 对氮素供应的响应以及氮肥管理决策。

基于水稻^[21-24]和小麦^[25-26]的植物指数(叶、茎、穗和叶面积指数)的氮浓度临界稀释曲线已经建立并得到了验证。作为“源”器官的叶片, 不同生育阶段由不同叶龄的叶片组成, 不同位置叶片的性质和功能是不同的, 所以, 非破坏性取样且快速实时的单叶监测冠层氮素浓度的氮营养诊断方式的好处被夸大。营养阶段, 叶片作为功能结构, 由于其氮素的重要生理功能, 基于整株植物叶片建立的临界氮浓度稀释曲线, 可以更深入地了解作物氮素状态^[10], 同时, 茎作为结构组分, 其干物质对植物总干物质的贡献显著高于叶片干物质, 因此, 它是整株植物临界氮浓度稀释曲线的最主要决定因素。相关研究^[21]也指出基于水稻的茎干物质建立临界氮浓度稀释曲线, 可以作为替代整株植物方法来评估植物氮的状况从而用来建立施肥决策。同时, Zhao 等^[26]指出, 叶片和茎为了满足各自代谢氮和结构氮的需求, 单独建立作物叶片干物质和茎干物质的临界氮浓度稀释曲线非常重要, 这也将有利于作物模拟模型参数的确定^[27]。每种诊断方式都存在着利弊, 但对这些方法进行综合研究, 可以对植物氮的状况提供有用的

见解。现有的研究大多集中于使用地上部干物质和叶片干物质建立稀释曲线, 尽管基于其他部位的稀释曲线得到了建立, 但数量有限, 在玉米上更是少数。在陕西夏玉米主栽区, 对于临界曲线的研究仅局限于基于整株玉米干物质基础上建立的曲线^[28-29], 基于不同部位干物质的临界氮浓度稀释曲线的系统研究还未见报道, 本试验是对临界氮浓度稀释曲线在本生态区的验证和补充。此外, 作物生长期间的不同器官干物质分配和氮素分布, 对于理解实现作物最大产量的氮肥管理及其限制因素具有重要作用。所以, 对于研究基于不同部位干物质的临界氮浓度稀释曲线之间的联系, 以测试作物氮稀释理论在玉米开花前期诊断玉米氮素状况的适用性上还需试验数据来阐明。玉米氮素的诊断能够及时掌握各生育时期的营养状况, 因此, 要准确评估作物的氮素状况, 需要在作物关键生长阶段进行作物的氮素评估, 并以此确定科学合理的施肥决策。综上, 本研究利用不同氮效率夏玉米品种, 开发基于不同部位干物质的临界氮浓度稀释曲线, 以确定它们的差异。在此基础上, 采用作物关键生长阶段 NNI 和 AND 对玉米 RY 进行估算, 在西北气候条件下, 评估玉米的氮素营养状况, 预测产量。这项研究代表了对玉米干物质基础氮浓度稀释曲线的首次最全面的研究, 将为诊断植物氮素状况提供综合方法, 并为玉米关键生长阶段精确氮素管理提供指导, 从而为玉米产量估算提供有用的方法。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在西北农林科技大学试验基地进行。该试验基地位于陕西省杨凌(34°20'N, 108°24'E, 海拔 454.8 m), 属于暖温带季风半湿润气候区。近 20 年的年平均气温为 13.5℃, 每年的总日照时间为 2196 h, 该地点的年平均降水量为 580.5 mm, 年平均蒸发量为 993.2 mm。2014 年 6 月至 2017 年 10 月, 连续 4 个玉米季进行试验。试验地前茬作物为冬小麦, 试验地土壤类型为耧土, 耕层土壤化学性质为: 有机质 14.3 g kg⁻¹、全氮 1.09 g kg⁻¹、有效磷 9.4 mg kg⁻¹ 和速效钾 127 mg kg⁻¹。供试品种为正大 12 (氮高效品种, Zhengda 12, ZD) 和陕单 609 (氮低效品种, Shaandan 609, SD)。试验设计为随机区组设计, 每年每个处理 3 个重复, 小区面积 39 m², 株距 60 cm, 行距 25 cm。设置 4 个施氮水平, 纯氮施用量分别为 0 (N0)、150 (N150)、225 (N225) 和 300 kg hm⁻² (N300)。

1/2 纯氮在玉米播种前施入(播前 5 d), 剩余 1/2 纯氮在玉米大喇叭口期开沟追施。磷和钾肥在播种前一次性施入, 用量均为 150 kg hm⁻²。氮肥为尿素(含 N 46.4%), 磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12.0%), 钾肥为氯化钾(含 K₂O 60.0%)。

玉米播种时间分别为 2014 年 6 月 12 日、2015 年 6 月 12 日、2016 年 6 月 17 日和 2017 年 6 月 15 日, 在三叶期定苗为 67,500 株 hm⁻²。玉米收获时间分别为 2014 年 10 月 14 日、2015 年 10 月 15 日、2016 年 10 月 3 日和 2017 年 10 月 14 日。田间管理与当地保持一致, 三至五叶期进行化学除草, 拔节期防治病虫害。试验在大喇叭口期以 75 mm 的水量进行灌溉。

1.2 测定项目及方法

在玉米的 V3、V6、V8、V12、VT 和 R6 时期[分别代表玉米的三叶期、六叶期(拔节期)、八叶期、十二叶期(大喇叭口期)、抽雄期和完熟期], 4 年对应的时间在表 1 中呈现。每个小区选择具有 3~5 株玉米, VT 之前植株分为叶片和茎 2 个部分, VT 之后, 植株分为叶片、茎、穗轴、苞叶和籽粒, 所有部分在 105℃ 杀青 30 min, 然后在 70℃ 烘干至恒重, 分别称重, 记录叶片、茎和植株的总质量。粉碎过 100 目筛后, 称取 0.02 g 样品, 采用半微量凯氏定氮法测定各部位的氮浓度^[30]。

玉米收获时, 每个小区随机收获 30 个玉米进行晾晒和脱粒, 测定籽粒产量, 并按照国家玉米籽粒入库标准(含水量 14%)折算产量。

1.3 基于各部位干物质临界氮浓度稀释曲线的建立

根据 Justes^[8]的方法, 计算临界氮浓度稀释曲线的步骤如下: (1)利用单因素方差分析, 对不同氮水平的地上部植株干物质(叶片干重和茎干重)分为作物生长受氮素限制组和氮充足作物生长不受氮素限制组; (2)对受氮素限制处理的干物质与氮浓度进行线性拟合, 对不受氮素限制处理的干物质取平均值并通过平均值做垂直于横轴的垂线, 2 条直线的交点为临界氮浓度; (3)拟合干物质与对应临界氮浓度的散点图, 基于幂回归模型(Freundlich 模型)的异速函数用于确定观察到的氮浓度降低与叶片、茎和植株干物质(LDM, SDM 和 PDM)增加之间的关系。玉米临界氮浓度稀释曲线模型为:

$$N_c = aDM^{-b} \quad (1)$$

式中, N_c 代表作物临界氮含量, g kg⁻¹; DM 为地上部干物质, t hm⁻²; 参数 a 代表干物质为 1 t 时的临界氮浓度, 参数 b 为临界氮浓度稀释曲线斜率的统计学参数。

表1 2014–2017年干物质取样时期

Table 1 Dry matter sampling period from 2014 to 2017

项目 Item	V3 (M/D)	V6 (M/D)	V8 (M/D)	V12 (M/D)	VT (M/D)	R6 (M/D)
2014	6/27	7/12	7/17	7/30	8/13	10/14
2015	6/29	7/15	7/20	8/2	8/17	10/15
2016	7/1	7/14	7/21	7/31	8/15	10/3
2017	6/29	7/13	7/21	8/4	8/13	10/14

V3、V6、V8、V12、VT 和 R6 分别表示玉米的三叶期、六叶期(拔节期)、八叶期、十二叶期(大喇叭口期)、抽雄期和完熟期。

V3, V6, V8, V12, VT, and R6 represent the third, sixth, eighth, twelfth leaf stages, tasseling and physiological maturity stages, respectively. M/D: month/day.

1.4 临界氮浓度稀释曲线模型的验证

为了校验模型的精度, 本研究通过计算标准化均方根误差(n -RMSE)来评判模型的精度:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$n-RMSE = \frac{RMSE}{S} \times 100\% \quad (3)$$

模型的验证采用标准化均方根误差 n -RMSE^[31] 来检测模型的拟合度。

式中: P_i 和 O_i 分别为临界氮测定值和模拟值; n 为样本量; S 为实测数据的平均值。RMSE 值越小, 模拟值与测定值的一致性越好, 偏差越小, 即模型的预测精度越高。Jamieson 等^[32]认为: 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。

最大氮曲线($N_{\max}$)通过使用不受氮素限制的数据点建立(2014 年和 2015 年的 N300 处理), 最小氮曲线($N_{\min}$)通过使用受氮素限制处理的数据点建立。2016 和 2017 年的试验数据用于验证 N_c 、 $N_{\max}$ 和 $N_{\min}$ 曲线^[7]。

1.5 氮营养指数、氮亏缺相对产量和氮效率的计算

为了更精确地反映玉米植株氮素是否适宜, 氮素营养指数(NNI)被用来评估玉米生育期内的氮素状况。

$$NNI = \frac{N_a}{N_c} \quad (4)$$

式中, N_a 为地上部氮浓度实测值, N_c 为地上部氮浓度的临界值。当 $NNI = 1$ 时氮营养状况为最适的, 当 $NNI > 1$, 氮营养处于过剩的状况, 反之, 当 $NNI < 1$ 时, 植株处于营养不足的状态。

根据式(4)可以推出玉米氮积累亏缺(AND)^[18]:

$$AND = N_{cna} - N_{na} \quad (5)$$

式中, AND 为氮亏缺量(kg hm⁻²), N_{cna} 为临界氮浓度下作物氮素积累量(kg hm⁻²), N_{na} 为作物实际氮素积

累量(kg hm⁻²)。当 AND = 0 时, 证明作物体内氮素最佳, 当 AND > 0 时, 说明氮积累不足, 当 AND < 0 时, 说明氮素积累过量。

相对产量(RY) = 籽粒产量/最高产量

氮肥偏生产力(partial factor productivity nitrogen, PFPN) = 籽粒产量/施氮量

氮肥回收率(recovery efficiency of nitrogen, REN) = (施氮植株含氮量-不施氮植株含氮量)/施氮量

氮素利用效率(nitrogen utilization efficiency, NutE) = 籽粒产量/植株氮素积累量

氮素吸收效率(nitrogen uptake efficiency, NupE) = 植株氮素积累量/(土壤氮+施氮量)

1.6 产量预测模型的建立和验证

对 4 年的试验数据进行方差分析, 用 2014 年和 2015 年的试验数据分别对 NNI 和 AND 与 RY 每个时期进行回归分析, 2016 年和 2017 年获得的试验数据对以上回归模型进行验证。根据回归分析结果, 将 4 年的数据进行汇总, 以建立最终产量预测模型。预测值和观察值之间的决定系数(R^2), 均方根误差(RMSE)和标准化均方根误差 n -RMSE 用于检验 NNI, AND 和 RY 之间的回归模型的拟合度。

1.7 数据分析

每个采样期, 年份和品种的数据, 用 SPSS 18.0 进行方差分析(SPSS Inc., Chicago, IL, USA)。采用最小显著差异法进行处理间的比较, 显著水平为 0.05。 N_c 曲线回归分析使用 Microsoft Excel 2013 进行。用 SPSS 18.0 对 RY 和 NNI 与 RY 和 AND 进行线性加平台分析。

2 结果与分析

2.1 基于不同部位临界氮浓度稀释曲线构建及临界氮浓度常数的确定

4 年的试验结果表明, 2 个玉米品种的氮效率存在显著差异(表 2), 除 2017 年氮肥回收效率和 2015

表 2 2014–2017 年正大 12 和陕单 609 的氮效率
Table 2 Nitrogen use efficiencies of ZD and SD from 2014 to 2017

施氮量 Nitrogen rate	品种 Cultivar	氮肥偏生产力 Partial factor productivity nitrogen (PFPN, kg kg ⁻¹)				氮肥回收效率 Recovery efficiency of nitrogen (REN, %)				氮素利用率 Nitrogen utilization efficiency (NutE, kg kg ⁻¹)				氮素吸收效率 Nitrogen uptake efficiency (NupE, kg kg ⁻¹)			
		2014	2015	2016	2017	2014	2015	2016	2017	2014	2015	2016	2017	2014	2015	2016	2017
N0	ZD									79.1 a	78.4 a	71.0 a	72.6 a	69.5 a	76.6 a	79.9 a	98.0 a
	SD									73.0 b	69.9 b	61.2 b	63.3 b	62.1 b	64.6 b	66.8 b	76.9 b
N150	ZD	62.7 a	67.9 a	64.9 a	70.1 a	36.2 a	44.9 a	45.3 a	39.5 a	60.9 a	59.0 a	51.4 a	57.6 a	35.6 a	36.9 a	37.3 a	40.4 a
	SD	54.3 b	55.4 b	56.9 b	58.3 b	29.8 b	36.6 b	34.4 b	39.3 a	57.6 b	52.7 b	49.2 b	49.1 b	30.8 b	30.1 b	31.7 b	32.0 b
N225	ZD	46.7 a	49.2 a	50.8 a	50.8 a	40.7 a	43.5 a	38.0 a	39.3 a	54.9 a	54.5 a	54.9 a	53.9 a	30.7 a	30.3 a	30.5 a	24.3 a
	SD	39.7 b	40.8 b	43.5 b	44.3 b	38.1 b	36.9 b	34.4 b	37.7 a	48.9 b	49.5 b	49.0 b	48.9 b	26.1 b	25.2 b	25.7 b	20.7 b
N300	ZD	34.0 a	35.7 a	37.6 a	36.7 a	35.4 a	35.9 a	37.0 a	32.6 a	49.4 a	50.2 a	48.2 a	49.8 a	24.4 a	23.7 a	24.5 a	18.4 a
	SD	30.3 b	30.8 b	32.4 b	32.8 b	34.7 a	34.2 a	32.6 b	34.2 a	45.3 a	45.1 b	44.2 b	44.3 b	21.8 b	20.5 b	20.8 b	15.6 b
方差分析	品种 Cultivar (C)	**	**	**	**	**	**	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	**
ANOVA	氮肥 Nitrogen rate (N)	**	**	**	**	**	**	ns	ns	**	**	**	**	**	**	**	**
	品种×氮肥 C×N	**	**	ns	**	ns	**	ns	ns	*	**	ns	**	ns	**	**	**

SD: 陕单 609; ZD: 正大 12; N0、N150、N225 和 N300 分别代表施氮量 0、150、225 和 300 kg N hm⁻²。同列标以不同字母的值在处理间差异显著 ($P < 0.05$)。ns 表示差异性不显著, * 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著, ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著。

SD: Shaandan 609; ZD: Zhengda 12; N0, N150, N225, and N300 represent four nitrogen application rates at 0, 150, 225, and 300 kg N hm⁻², respectively. Values within the same column followed by different letters are significant difference at $P < 0.05$ among different treatments. ns: not significant, * and ** indicate significant difference at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

图 1 基于叶片、茎和植株干物质建立的 2 个玉米品种临界氮浓度稀释曲线的差异比较

Fig. 1 Comparison of critical N dilution curves of two maize hybrids on different bases (leaf dry matter basis, stem dry matter basis, and plant dry matter basis) with varied nitrogen rates

SD: 陕单 609; ZD: 正大 12; N_c : 地上部氮浓度的临界值; LDM: 叶片干物质; SDM: 茎干物质; PDM: 植株干物质。“○”表示品种陕单 609, “●”表示品种正大 12; “—”表示品种陕单 609, “- - -”表示品种正大 12. ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著。

SD: Shaandan 609; ZD: Zhengda 12; N_c : critical value of shoot nitrogen concentration; LDM: leaf dry matter basis; SDM: stem dry matter basis; PDM: plant dry matter. Shaandan 609 is marked by “○”, Zhengda 12 is marked by “●”; “—” means the curves of Shaandan 609, “- - -” means the curves of Zhengda 12. ** indicates significant difference at $P < 0.01$.

年 N 300 处理外, 不同年际, 2 个玉米品种氮效率差异均达到显著水平, ZD 的氮效率显著高于 SD。本试验中, ZD 被定义为氮高效品种, SD 被定义为氮低效品种。在本研究中, 用 2014 年和 2015 年试验数据, 对 2 个品种分别基于叶片、茎和植株干物质 (LDM、SDM 和 PDM) 建立了临界氮浓度稀释曲线。从图 1 中可以看出, 建立基于叶片、茎和植株干物质的临界氮浓度模型的数据, 适宜叶片、茎和植株干物质的范围分别是 0.76~2.93、1.03~5.14 以及 1.78~10.59 t hm⁻²。基于叶片、茎和植株干物质建立的临界氮浓度曲线的参数 a 和 b 值的范围分别是 1.58~2.64 和 0.204~0.388。其中, 对于参数 a 来说, 基

于叶片干物质的临界氮浓度稀释曲线的 a 值最大, 最小的是茎干物质临界氮浓度稀释曲线的 a 值; 而对于参数 b 来说, 正相反, 基于茎干物质的临界氮浓度稀释曲线的值最大, 而基于叶片干物质的临界氮浓度稀释曲线的值最小。2 个品种基于 LDM、SDM 和 PDM 临界氮浓度稀释曲线的 R^2 的范围为 0.86~0.98。对 2 个品种分别进行临界氮浓度稀释曲线的拟合, ‘ZD’方程为: $N_c = 2.64 \text{ LDM}^{-0.204}$ 、 $N_c = 1.58 \text{ SDM}^{-0.388}$ 、 $N_c = 2.33 \text{ PDM}^{-0.263}$; ‘SD’方程为: $N_c = 2.61 \text{ LDM}^{-0.205}$ 、 $N_c = 1.83 \text{ SDM}^{-0.337}$ 、 $N_c = 2.47 \text{ PDM}^{-0.237}$ 。为进一步分析基于不同部位建立的临界氮浓度稀释曲线 2 个品种的差异, 将曲线直线化处理, 采用协方差分析方法^[33], 得到结果, 2 个品种叶片斜率和截距得到的 P 值大于 0.05, 而茎和植株斜率和截距得到的 P 值都小于 0.05, 说明除叶片外, 基于茎和植株干物质建立的临界氮浓度稀释曲线在品种间存在显著差异。

2.2 临界氮浓度稀释曲线的验证

选取 2016 年和 2017 年数据对临界氮浓度曲线进行验证。结果表明, N_c 稀释曲线可以区分玉米受氮素限制和不受氮素限制的生长条件。受氮素限制处理的所有数据点基本上都落在 N_c 稀释曲线的下方, 不受氮素限制处理的数据点落在 N_c 稀释曲线上或者在其之上(图 2)。同时, 校验模型的精度, 其步骤为: 将实测干物质数据点分别带入式(1)中计算临界氮含量模拟值, 将模拟值分别与观测值比较(表 3)。氮高效品种 ZD 基于叶片、茎和植株模型偏差分别为 1.8%、16.7%和 9.1%, <20%模型稳定性极好或较好, 氮低效品种 SD 偏差分别为 1.4%、3.5%和 5.0%, <10%模型稳定性极好。可见, 所构建的 2 个品种的临界氮浓度稀释曲线模型具有很好的精度, 表明本研究所建立的不同氮效率品种基于各部位的临界氮浓度稀释曲线可进一步用于植株的氮营养诊断。

表 3 临界氮浓度稀释曲线的验证

Table 3 Calibration of critical N dilution curve basis on leaf dry matter, stem dry matter and plant dry matter in maize

参数 Parameter	正大 12 Zhengda 12		陕单 609 Shaandan 609	
	RMSE	n-RMSE	RMSE	n-RMSE
叶片 Leaf	0.043	1.799	0.032	1.354
茎 Stem	0.192	16.733	0.048	3.549
植株 Plant	0.148	9.135	0.088	4.996

图 2 用 2016–2017 年获得的数据验证 N_c 稀释曲线

Fig. 2 Validation of the N_c dilution curve using data from experiments performed from 2016 to 2017

符号(○)和(×)分别代表 2016 年和 2017 年的不受氮素限制值和受氮素限制值。a、b 和 c 实线分别代表陕单 609 的叶片、茎和植株的 N_c 稀释曲线, d、e 和 f 实线分别代表正大 12 的叶片、茎和植株的 N_c 稀释曲线。两侧的虚线代表最小和最大的曲线, 用 2014–2015 年不受氮素限制值(△)和受氮素限制值()获得。 N_{min} 和 N_{max} 为氮浓度最小和最大值; LDM: 叶片干物质; SDM: 茎干物质; PDM: 植株干物质。** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著。

The symbols (○) and (×) represent non-N-limiting and N-limiting values from 2016 to 2017, respectively. The solid curved lines a, b, and c represent the N_c dilution curves of the leaf, stem, and plant of Shandan 609, respectively, and the solid curved lines d, e, and f represent the N_c dilution curves of the leaf, stem, and plant of Zhengda 12, respectively. The dotted lines on either side represent the curves for the minimum limits, which are developed using data from N-limiting () and non-N-limiting (△) treatments from 2014 to 2015. N_{min} and N_{max} are minimum and maximum of nitrogen concentration; LDM: leaf dry matter basis; SDM: stem dry matter basis; PDM: plant dry matter. ** indicates significant difference at $P < 0.01$.

2.3 基于不同部位临界氮浓度稀释曲线氮营养指数和相对产量, 氮亏缺和相对产量的关系

NNI 与 RY, AND 与 RY 之间的关系如图 3~图 5 所示, 随着 NNI 的增加, RY 均呈现线性的增长趋势, 直到 RY 不随 NNI 的增加为止, 其变化趋势呈现出线性加平台模式。相反, 随着 AND 的增加, RY 均呈现先不变后线性降低的趋势。基于叶片干物质的临界氮浓度稀释曲线, NNI 与 RY 之间的决定系数范围

为 0.961~0.997, AND 与 RY 之间的决定系数范围为 0.920~0.997, 基于茎干物质的临界氮浓度稀释曲线, NNI 与 RY 之间的决定系数范围为 0.956~0.995, AND 与 RY 之间的决定系数范围为 0.919~0.991, 基于植株干物质的氮临界曲线, NNI 与 RY 之间的决定系数范围为 0.913~0.992, AND 与 RY 之间的决定系数范围为 0.969~0.996。因此, 可以从作物营养生长的氮营养状态评价对产量的影响。

图3 基于叶片干物质建立的临界氮浓度曲线得到的RY与NNI和AND的关系

Fig. 3 Relationships between relative yield (RY) and the nitrogen nutrition index (NNI), relative yield (RY) and the accumulated nitrogen deficit (AND) of two maize hybrids with varied N rates on the base of leaf dry matter N dilution curves

V3、V6、V8、V12、VT和R6分别代表玉米的三叶期、六叶期(拔节期)、八叶期、十二叶期(大喇叭口期)、抽雄期和完熟期。SD: 陕单 609; ZD: 正大 12; “△”表示品种陕单 609, “—”表示品种正大 12; “.....”表示品种正大 12。表示在 $P < 0.01$ 水平上显著。V3、V6、V8、V12、VT和R6 represent the third, sixth, eighth, twelfth leaf stages, tasseling and physiological maturity stages, respectively. SD: Shaandan 609; ZD: Zhengda 12; Shaandan 609 is marked by “△”, Zhengda 12 is marked by “—”; “.....” means the curves of Shandan 609, “.....” means the curves of Zhengda 12. ** indicates significant difference at $P < 0.01$.

2.4 相对产量模型的验证和最终模型

NNI与RY之间关系的RMSE变化范围为0.03~0.12, n -RMSE的变化范围为2.82~13.7, R^2 的变化范围为0.76~0.99。AND与RY之间的RMSE的

变化范围为0.06~0.13, n -RMSE的变化范围为3.55~14.84, R^2 的变化范围为0.65~0.98(表4)。NNI和RY的关系及AND和RY的关系,在V12和VT两个时期基于叶片、茎和植株氮稀释模型建立的回

图 4 基于茎干物质建立的临界氮浓度曲线得到的 RY 与 NNI 和 AND 的关系

Fig. 4 Relationships between relative yield (RY) and the nitrogen nutrition index (NNI), relative yield (RY) and the accumulated nitrogen deficit (AND) of two maize hybrids with varied N rates on the bases of stem dry matter N dilution curves

缩写和符号同图 3. ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著。

Abbreviations and symbols are the same as those given in Fig. 3. ** indicates significant difference at $P < 0.01$.

归关系 RMSE 和 n -RMSE 在 2 个品种中较小, 同时 R^2 较大, 综合来看, 这 2 个时期模型的稳定性最强, 在 NNI 与 RY 之间和 AND 与 RY 之间的关系对玉米生产中产量的估计具有实际意义。基于 NNI 与 RY 和 AND 与 RY 关系的精度和准确度的综合考虑, 对 V12 和 VT 两个时期建立相对产量模型(表 5), $R^2 > 0.941$ 。

3 讨论

近 20 年来, 临界氮浓度稀释曲线一直被用于作物的氮精确管理。在不同气候条件下, 在 LDM、SDM、穗干物质和 PDM 基础上建立了临界氮浓度稀释曲线^[22,34-36]。本研究在不同氮效率玉米品种上建立临界氮浓度稀释曲线与现有这些曲线进行比较

图 5 基于植株干物质建立的临界氮浓度曲线得到的 RY 与 NNI 和 AND 的关系

Fig. 5 Relationships between relative yield (RY) and the nitrogen nutrition index (NNI), relative yield (RY) and the accumulated nitrogen deficit (AND) of two maize hybrids with varied N rates on the bases of plant dry matter N dilution curves

缩写和符号同图 3. ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著。

Abbreviations and symbols are the same as those given in Fig. 3. ** indicates significant difference at $P < 0.01$.

来评估玉米的氮营养状况,以深入了解这一概念,然后找到最合适的估算氮营养方法同时建立产量预测模型。

3.1 基于不同部位建立的临界氮浓度稀释曲线之间的对比及与其他模型的比较

与之前玉米、小麦和水稻作物上基于不同部位建立的氮浓度稀释曲线一致^[9,19,34],基于 LDM 和 SDM 的临界氮浓度稀释曲线与基于 PDM 的模型建

立基本一致。2 个品种各部位的临界氮浓度稀释曲线的决定系数均达到显著水平,在不同年份间具有很好的稳定性,因此,可以用于对关中地区夏玉米氮素的诊断方法。在作物中使用不同的植物指数和氮浓度的关系,而不是单独使用 PDM,有利于增进对临界氮浓度稀释曲线概念的理解^[22]。对本文建立的基于不同部位的临界氮浓度稀释曲线和已经发表的不同指标下的临界氮浓度稀释曲线做综合性的比

表 4 相对籽粒产量(RY)的 RMSE, n -RMSE 和 R^2 的值(根据 2016–2017 年不同时期的氮营养指数(NNI)和累积氮亏(AND)预测)
Table 4 Values of RMSE, n -RMSE and R^2 for prediction of relative yield (RY) from nitrogen nutrition index (NNI), and accumulated nitrogen deficit (AND), respectively, at different growth stages using data obtained in 2016 and 2017

部位 Organ or plant	品种 Cultivar	参数 Parameter	氮亏缺 Accumulated nitrogen deficit (AND)					氮营养指数 Nitrogen nutrition index (NNI)				
			V3	V6	V8	V12	VT	V3	V6	V8	V12	VT
叶片 Leaf	正大 12 Zhengda 12	RMSE	0.08	0.08	0.09	0.03	0.05	0.08	0.12	0.08	0.05	0.05
		n -RMSE	9.10	9.04	10.41	3.51	5.23	8.85	13.65	8.39	5.72	5.31
		R^2	0.90	0.89	0.86	0.98	0.96	0.90	0.76	0.91	0.95	0.96
	陕单 609 Shaandan 609	RMSE	0.11	0.06	0.08	0.05	0.05	0.08	0.07	0.07	0.03	0.05
		n -RMSE	12.40	6.86	8.69	5.81	5.40	8.80	8.12	7.90	2.82	5.11
		R^2	0.83	0.93	0.88	0.95	0.95	0.88	0.90	0.90	0.98	0.96
茎 Stem	正大 12 Zhengda 12	RMSE	0.11	0.10	0.10	0.06	0.06	0.08	0.10	0.06	0.06	0.06
		n -RMSE	11.83	10.66	10.96	7.16	6.67	8.81	11.40	6.46	6.79	6.49
		R^2	0.83	0.85	0.84	0.93	0.94	0.90	0.82	0.94	0.94	0.94
	陕单 609 Shaandan 609	RMSE	0.10	0.10	0.06	0.04	0.04	0.06	0.08	0.05	0.04	0.03
		n -RMSE	11.00	11.12	6.35	3.92	4.18	6.46	9.14	5.57	4.74	3.16
		R^2	0.87	0.81	0.94	0.97	0.97	0.93	0.87	0.95	0.96	0.98
植株 Plant	正大 12 Zhengda 12	RMSE	0.15	0.09	0.07	0.06	0.04	0.10	0.09	0.06	0.06	0.04
		n -RMSE	17.09	9.87	7.81	6.11	4.63	10.70	9.97	7.03	6.57	4.38
		R^2	0.65	0.88	0.92	0.95	0.97	0.86	0.88	0.94	0.94	0.97
	陕单 609 Shaandan 609	RMSE	0.12	0.10	0.08	0.04	0.07	0.08	0.09	0.04	0.03	0.04
		n -RMSE	13.47	11.25	8.32	4.65	7.85	9.24	9.42	4.91	3.03	4.93
		R^2	0.80	0.86	0.92	0.97	0.93	0.91	0.90	0.97	0.99	0.97

V3、V6、V8、V12、VT 和 R6 分别代表玉米的三叶期、六叶期(拔节期)、八叶期、十二叶期(大喇叭口期)、抽雄期和完熟期。

V3, V6, V8, V12, VT, and R6 represent the third, sixth, eighth, twelfth leaf stages, tasseling, and physiological maturity stages, respectively.

较。在临界氮浓度稀释曲线中, 参数 a 代表单位生物量氮浓度; 参数 b 代表临界氮浓度, 随地上部干物质的增加而递减。与前人研究结果相比(表 6), 植株临界氮浓度曲线的结果接近陕西关中地区参数 a 的范围 2.14~2.25, 参数 b 的范围 0.14~0.31, 这 2 个参数的值低于已有的其他模型^[37-38], 进一步说明已有模型在关中地区不适宜, 需要建立属于本生态环境下全面的临界氮浓度稀释曲线。2 个品种植株临界氮浓度稀释曲线 a 值存在显著差异, 说明参数 a 受到品种的影响。强生才等^[28]对不同降雨年型下植株临界氮浓度曲线的建立指出参数 b 会随降雨年型的改变而改变。本研究结果进一步补充了该地区模型在玉米品种建立上的缺失。同一个试验中基于玉米不同部位建立的临界氮浓度稀释曲线表明, 基于 LDM 临界曲线参数 b 值最小, 说明叶片作为主要代谢器官的重要生理作用, 这一结果与在水稻研究中^[22]的结果一致。同时, 基于 SDM 的临界氮浓度稀释曲线参数 b 大于基于 LDM 的临界氮浓度稀释曲线的 b 值, 这表明玉米的茎氮浓度低于叶片氮浓度, 而其稀释速率高于叶片的稀释速率, 这种差异主要

是由于茎叶比引起的, 营养生长期玉米叶片作为主要的光合器官, 大量的氮素从植物的结构组分(茎)转运到代谢组分(叶)以需要维持一定的氮浓度保证光合作用运行, 导致叶片氮浓度的缓慢下降^[39]。在玉米不同器官氮积累变化的研究中发现, 叶片氮浓度始终高于茎, 并且随着干物质转运过程的发生而变化, 从而造成了茎氮浓度稀释速率高于叶片^[40-41]。基于小麦和水稻 LDM 的临界氮浓度稀释曲线也得出了几乎相似的 b 值^[14,23]。同时氮高效品种与氮低效品种叶片参数 a 和 b 值相似, 氮高效品种茎和植株的参数 a 值低于氮低效品种, 而茎和植株的参数 b 值高于氮低效品种。与不同玉米品种研究结果相似, a 和 b 值的变化方向是一致^[42], 本试验结果进一步表明, 造成氮效率的差异主要来自于茎的差异而不是叶片。这可能反映了氮高效品种的茎中氮素高的稀释速率, 一方面与其干物质的快速积累有关, 另一方面反映出氮素在不同器官的分配, 氮高效品种在营养生长阶段高的茎氮素稀释速率, 保证转运到叶片更多氮素以维持光合作用, Chen 等^[43]的结果指出, 与氮低效品种相比, 氮高效品种具有较高的茎

表 5 V12 和 VT 时期氮营养指数(NNI)和累积氮亏缺(AND)的相对产量(RY)的预测模型(根据 4 年试验数据估算)
Table 5 Prediction models for estimation of relative yield (RY) from nitrogen nutrition index (NNI) and accumulated nitrogen deficit (AND) at V12 and VT stage using pooled data of four years

处理 Treatment	生育时期 Growth stage	R ²	回归方程 Regression equation (RY-AND)	R ²	回归方程 Regression equation (RY-NNI)
ZD leaf	V12	0.94	RY = 1.081-0.026AND if AND > 3.5 and RY = 0.99 AND ≤ 3.5	0.96	RY = -0.01+NNI if NNI<0.95 and RY = 0.99 NNI ≥ 0.95
	VT	0.95	RY = 1.138-0.028AND if AND > 5.3 and RY = 0.99 AND ≤ 5.3	0.96	RY = -0.033+1.1NNI if NNI<0.93 and RY = 0.99 NNI ≥ 0.93
SD leaf	V12	0.98	RY = 1.010-0.019AND if AND > 0.5 and RY = 1 AND ≤ 0.5	0.98	RY = 0.284+0.688NNI if NNI<1.04 and RY = 1 NNI ≥ 1.04
	VT	0.98	RY = 0.997-0.017AND if AND > 0.4 and RY = 0.99 AND ≤ 0.4	0.98	RY = 0.271+0.705NNI if NNI<1.02 and RY = 0.99 NNI ≥ 1.02
ZD stem	V12	0.97	RY = 1.079-0.023AND if AND > 3.6 and RY = 0.99 AND ≤ 3.6	0.97	RY = 0.418+0.615NNI if NNI<0.93 and RY = 0.99 NNI ≥ 0.93
	VT	0.98	RY = 1.182-0.024AND if AND > 8 and RY = 0.99 AND ≤ 8	0.98	RY = 0.414+0.678NNI if NNI<0.85 and RY = 0.99 NNI ≥ 0.85
SD stem	V12	0.98	RY = 1.014-0.016AND if AND > 1.5 and RY = 0.99 AND ≤ 1.5	0.98	RY = 0.494+0.506NNI if NNI<1 and RY = 1 NNI ≥ 1
	VT	0.98	RY = 1.006-0.01AND if AND > 1.6 and RY = 0.99 AND ≤ 1.6	0.99	RY = 0.565+0.405NNI if NNI < 1.05 and RY = 0.99 NNI ≥ 1.05
ZD plant	V12	0.97	RY = 1.148-0.015AND if AND > 10.5 and RY = 0.99 AND ≤ 10.5	0.97	RY = 0.188+0.881NNI if NNI < 0.91 and RY = 0.99 NNI ≥ 0.91
	VT	0.98	RY = 1.072-0.01AND if AND > 8.2 and RY = 0.99 AND ≤ 8.2	0.98	RY = 0.139+0.886NNI if NNI < 0.96 and RY = 0.99 NNI ≥ 0.96
SD plant	V12	0.98	RY = 1.048-0.01AND if AND > 4.8 and RY = 1 AND ≤ 4.8	0.99	RY = 0.351+0.669NNI if NNI < 0.97 and RY = 1 NNI ≥ 0.97
	VT	0.98	RY = 1.013-0.005AND if AND > -4.6 and RY = 0.99 AND ≤ -4.6	0.98	RY = 0.412+0.556NNI if NNI < 1.06 and RY = 1 NNI ≥ 1.06

ZD leaf、ZD stem 和 ZD plant 分别代表正大 12 的叶片、茎和植株; SD leaf、SD stem 和 SD plant 分别代表陕单 609 的叶片、茎和植株。V12 和 VT 代表十二叶期和抽穗期。RY: 相对产量; AND: 氮亏缺; NNI: 氮营养指数。
ZD leaf, ZD stem, and ZD plant indicate the leaf, stem, and plant of Zhengda 12; SD leaf, SD stem and SD plant indicate the leaf, stem, and plant of Shaandan 609. V12 and VT represent the twelfth leaf stage and tasseling stage. RY: relative yield; AND: accumulated nitrogen deficit; NNI: nitrogen nutrition index.

表 6 基于不同部位建立的临界氮浓度稀释曲线与其他模型参数的比较

Table 6 Comparison of parameters of critical N dilution curves based on different organs and other model parameters

部位 Organ	作物 Crop	地点 Site	<i>a</i>	<i>b</i>	参考文献 Reference
植株 Plant	玉米 Maize	关中平原 Guanzhong Plain	2.25	0.27	Li Z P et al. ^[29]
		黄淮海平原 Huanghuaihai Plain	3.34	0.396	Liang X G et al. ^[38]
		华北平原 North China Plain	2.72	0.27	Yue S C et al. ^[37]
		本试验 This study	2.47	0.24	
			2.33	0.26	
叶片 Leaf	玉米 Maize	黄淮海平原 Huanghuaihai Plain	3.45	0.22	Zhao B et al. ^[10]
		长江中下游平原 the Middle-Lower Yangtze Plains	3.76	0.22	Wang X L ^[44]
		小麦 Wheat	3.06	0.15	Yao X et al. ^[23]
		关中平原 Guanzhong Plain	3.96	0.14	Qiang S C et al. ^[45]
		本试验 This study	2.64	0.20	
			2.61	0.21	
茎 Stem	小麦 Wheat	长江中下游平原 the Middle-Lower Yangtze Plains	2.50	0.44	Wang X L ^[44]
		水稻 Rice	2.26	0.32	Ata-Ul-Karim S T et al. ^[22]
		本试验 This study	1.58	0.39	
			1.83	0.34	

a 和 *b* 为模型参数。 *a* and *b* are the model parameters.

的氮转运效率。氮高效品种干物质及氮素在各器官的分配使得其能够在较低的氮素需求下实现高产。玉米基于茎干物质建立的临界氮浓度稀释曲线仍是一个空白, 本试验证明基于 SDM 的临界氮浓度稀释曲线可以用于玉米氮营养诊断, 参数 *a* 比其他作物(小麦和水稻)要小, 这也是造成本地区整株植株水平参数 *a* 偏低的原因^[37], 参数 *b* 与其他作物上相似, 对于不同的氮效率品种来说, *b* 值差异显著, 可以用于品种间的氮营养诊断。

3.2 对夏玉米氮素诊断和作物建模的意义

建立基于 LDM、SDM 和 PDM 的临界氮浓度稀释曲线的主要目的是用农学的研究方法诊断作物的氮营养状态, 通过临界氮浓度稀释曲线来诊断夏玉米营养生育阶段的氮素盈亏状态, 建立与产量的模型^[46]从而对产量进行预测。同时, Zhao 等^[34]提出开花前玉米的氮素状态与花后穗部显著相关, 所以如果在开花前能很好的诊断玉米氮素状况对于花后施肥和成熟期产量的预测具有一定的预见性。在达到最佳氮肥水平前, 夏玉米的 NNI 和籽粒产量逐渐增加。本研究中的叶片 NNI 值的范围为 0.66~1.14, 茎 NNI 值的范围为 0.50~1.28, 植株 NNI 值为 0.62~1.20。各部位 NNI 值达到 1 左右时, 产量不再增加。Ziadi 等^[17]确定了当玉米的 NNI 低于 0.93 时, NNI 与 RY 之间呈正相关。基于植株 NNI 与产量的关系显示了使用 NNI 进行估算作物氮需求、作物氮状况和籽粒

产量潜力^[6-7,13-14,47]的可行性。V12-VT 时期是考虑玉米追施氮肥的关键时期, 并且在这阶段建立的模型具有很强的稳定性。与水稻相比^[22], 追肥相对靠后, Zhao 等^[34]指出玉米更依赖于开花后氮素的状况, 而小麦更依赖于花前氮的状况来满足穗部的生长, 这可能由于, 相比 C₃ 作物, C₄ 作物高的光合氮效率使得其可以利用低的氮素来获得高的产量。V12-VT 阶段的 RY 与 NNI 和 RY 与 AND 之间的关系准确地解释了在受氮素限制和不受氮素限制生长条件下 RY 的变化。因此, 这些阶段可以作为产量预测模型的最佳时期。相反, 早期营养生长过程中 RY 与 NNI 和 RY 与 AND 之间的关系, 稳定性相对较差, 因此预测玉米产量的准确性较差。造成稳定性较差的原因, 一方面, 在作物早期生长阶段, 茎叶比的变化比后期生长阶段变化更快, 玉米苗期到拔节后期的茎叶比和氮浓度差异较大^[10], 另一方面, 大田条件下, 玉米生长不均匀难以评估玉米的生长阶段。这些都会影响基于生长阶段的临界氮浓度稀释曲线对植物氮诊断的准确性。基于不同部位的临界氮浓度稀释曲线的 NNI 和 AND 可以对 RY 进行准确地预测, 顺应精准农业对玉米产量的实时估测提出的要求, 所以上述模型关系可以用于估计玉米籽粒产量和管理决策的制定。以上提出的诊断方法为作物模型参数的调整优化具有很大的借鉴, 以便在不同的气候条件、基因型和管理实践下应用。这些将有助于

提供对作物生长和产量的准确预测,为生产和管理决策提供支持。这种方法的应用可以帮助根据不同的氮肥施用量设定产量目标。除了破坏性采样方法外,叶绿素仪和冠层反射率等方法还可以用于 NNI 的快速和非破坏性估计^[7,48-49]。因此,RY 和 NNI 之间的关系的建立对于玉米产量的估算具有实际意义^[17]。在本研究中,关键生育时期,基于不同部位的临界氮浓度稀释曲线的 NNI 与 RY 和 AND 与 RY 的关系,可以看出在 V12-VT 时期基于 LDM、SDM 和 PDM 建立的临界氮浓度稀释曲线的 NNI 和 AND 对 RY 的预测是可靠的。鉴于该模型可准确地探测作物氮营养状况,因此,氮营养指数和氮素亏缺模型可以应用于精准农业变量施肥中。

总而言之,本研究表明,基于不同部位的临界氮浓度稀释曲线,玉米在关键生长阶段 RY 与 NNI 和 AND 的关系可以用于估算籽粒产量。特别是在 V12-VT 阶段的关系准确地解释了在受氮素限制和不受氮素限制生长条件下 RY 的偏差,并且可靠地用于预测籽粒产量。此外,利用 V12-VT 阶段的基于不同部位的临界氮浓度稀释曲线预测籽粒产量与玉米生产系统中追施氮肥的时间是同步的。因此,新建立的模型的实施不仅可以预测玉米产量潜力,而且有助于玉米生产中精确的氮素管理。为了保证模型更加广泛地应用,需要对不同气候、水分和耕作条件下进行模型建立和验证。

4 结论

本研究首次采用不同部位指标建立和比较评价了玉米临界氮浓度稀释曲线。使用独立的试验数据验证了 3 种临界氮浓度稀释曲线都是可靠的。基于 LDM、SDM 和 PDM 建立的临界氮浓度稀释曲线对 RY 的预测是稳定。因此,出于成本的考虑,在一定的条件下,可以用基于 LDM 和 SDM 建立的临界氮浓度稀释曲线可以取代基于 PDM 建立的临界氮浓度稀释曲线对玉米的氮素进行诊断和产量预测。在受氮素限制条件下,玉米基于不同部位计算的 NNI 与产量构成之间显著正相关。这项研究表明,基于不同部位的临界氮浓度稀释曲线的关键作物生长阶段的 RY-NNI 和 RY-AND 关系可以用于为玉米适当的氮肥施用量做出指导。特别是, V12-VT 阶段的稳定关系准确地解释了氮素缺乏和最佳生长条件下 RY 和 NNI 与 RY 和 AND 的变化,并且可以可靠地对 RY 进行预测,从而量化了开花前氮肥的施用量。

References

- [1] Erisman J W, Sutton M A, Galloway J, Klimont Z, Winiwarter W. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nat Geosci*, 2008, 1: 636-639.
- [2] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 施氮量对夏季玉米产量及土壤水氮动态的影响. *生态学报*, 2007, 27(1): 197-204.
Wang X N, Wang Z H, Li S X. The effect of nitrogen fertilizer rate on summer maize yield and soil water nitrogen dynamics. *Acta Ecol Sin*, 2007, 27(1): 197-204 (in Chinese with English abstract).
- [3] Ramanantenasoa M M J, Générmont S, Gilliot J M, Makowski D. Metamodeling methods for estimating ammonia volatilization from nitrogen fertilizer and manure applications. *J Environ Manag*, 2019, 236: 195-205.
- [4] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *Ambio*, 2002, 3: 64-71.
- [5] 宁芳, 张元红, 温鹏飞, 王瑞, 王倩, 董朝阳, 贾广灿, 李军. 不同降水状况下旱地玉米生长与产量对施氮量的响应. *作物学报*, 2019, 45: 777-791.
Ning F, Zhang Y H, Wen P F, Wang R, Wang Q, Dong Z Y, Jia G C, Li J. Responses of maize growth and yield to nitrogen application in dryland under different precipitation conditions. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 777-791 (in Chinese with English abstract).
- [6] Zhao B, Ata-UI-Karim S T, Liu Z D, Zhang J Y, Xiao J F, Liu Z G, Qin A Z, Ning D F, Yang Q X, Zhang Y H, Duan A W. Simple assessment of nitrogen nutrition index in summer maize by using chlorophyll meter readings. *Front Plant Sci*, 2018, 9: 11.
- [7] Zhao B, Liu Z D, Ata-UI-Karim S T, Xiao J F, Liu Z G, Qi A Z, Ning D F, Nan J Q, Duan A W. Rapid and nondestructive estimation of the nitrogen nutrition index in winter barley using chlorophyll measurements. *Field Crops Res*, 2016, 185: 59-68.
- [8] Justes E, Mary B, Meynard J M, Machet J M, Thelier-Huche L. Determination of A critical nitrogen dilution curve for winter-wheat Crops. *Ann Bot*, 1994, 74: 397-407.
- [9] Ata-UI-Karim S T, Yao X, Liu X J, Cao W X, Zhu Y. Development of critical nitrogen dilution curve of japonica rice in Yangtze River Reaches. *Field Crops Res*, 2013, 149: 149-158.
- [10] Zhao B, Ata-UI-Karim S T, Liu Z, Ning D F, Xiao J F, Liu Z G, Qin A Z, Nan J Q, Duan A W. Development of a critical nitrogen dilution curve based on leaf dry matter for summer maize. *Field Crops Res*, 2017, 208: 60-68.
- [11] Wang X L, Ye T Y, Ata-UI-Karim S T, Zhu Y, Liu L L, Cao W X, Tang L. Development of a critical nitrogen dilution curve based on leaf area duration in wheat. *Front Plant Sci*, 2017, 8: 1517.
- [12] 付江鹏, 贺正, 贾彪, 刘慧芳, 李振洲, 刘志. 滴灌玉米临界氮稀释曲线与氮素营养诊断研究. *作物学报*, 2020, 46: 290-299.
Fu J P, He Z, Jia B, Liu H F, Li Z Z, Liu Z. Critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition diagnosis of maize with drip irrigation. *Acta Agron Sin*, 2020, 46: 290-299 (in Chinese with English abstract).
- [13] Ata-UI-Karim S T, Liu X J, Lu Z Z, Yuan Z F, Zhu Y, Cao W X. In-season estimation of rice grain yield using critical nitrogen dilution curve. *Field Crops Res*, 2016, 195: 1-8.
- [14] Ata-UI-Karim S T, Liu X J, Lu Z Z, Zheng H B, Cao W X, Zhu Y.

- Estimation of nitrogen fertilizer requirement for rice crop using critical nitrogen dilution curve. *Field Crops Res*, 2017, 201: 32–40.
- [15] 岳松华, 刘春雨, 黄玉芳, 叶优良. 豫中地区冬小麦临界氮稀释曲线与氮营养指数模型的建立. *作物学报*, 2016, 42: 909–916.
- Yue S H, Liu C Y, Huang Y F, Ye Y L. Simulating critical nitrogen dilution curve and modeling nitrogen nutrition index in winter wheat in central Henan area. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 909–916 (in Chinese with English abstract).
- [16] Yao Y K, Miao Y X, Cao Q, Wang H Y, Gnyp M L, Bareth G, Khosla R, Yang W, Liu F Y, Liu C. In-season estimation of rice nitrogen status with an active crop canopy sensor. *IEEE J-Stars*, 2014, 7: 4403–4413.
- [17] Ziadi N, Bélanger G, Claessens A, Lefebvre L, Cambouris A N, Tremblay N, Nolin M C, Parent L E. Determination of a critical nitrogen dilution curve for spring wheat. *Agron J*, 2010, 102: 241–250.
- [18] Lemaire G, Jeuffroy M H, Gastal F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management. *Eur J Agron*, 2008, 28: 614–624.
- [19] Zhang K, Yuan Z F, Yang T C, Lu Z Z, Cao Q, Tian Y C, Zhu Y, Cao W X, Liu X J. Chlorophyll meter-based nitrogen fertilizer optimization algorithm and nitrogen nutrition index for in-season fertilization of paddy rice. *Agron J*, 2020, 112: 1–13.
- [20] Ziadi N, Brassard M, Bélanger G, Claessens A, Tremblay N, Cambouris A, Nolin M, Parent L E. Chlorophyll measurements and nitrogen nutrition index for the evaluation of corn nitrogen status. *Agron J*, 2008, 100: 271–273.
- [21] Ata-Ul-Karim S T, Yao X, Liu X J, Cao W X, Zhu Y. Determination of critical nitrogen dilution curve based on stem dry matter in rice. *PLoS One*, 2014, 9: e104540.
- [22] Ata-Ul-Karim S T, Zhu Y, Liu X J, Cao Q, Tian Y C, Cao W X. Comparison of different critical nitrogen dilution curves for nitrogen diagnosis in rice. *Sci Rep*, 2017, 7: 42679.
- [23] Yao X, Zhao B, Tian Y C, Liu X J, Ni J, Cao W X, Zhu Y. Using leaf dry matter to quantify the critical nitrogen dilution curve for winter wheat cultivated in eastern China. *Field Crops Res*, 2014, 159: 33–42.
- [24] Huang S Y, Miao Y X, Cao Q, Yao Y K, Zhao G M, Yu W F, Shen J N, Yu K, Bareth G. A new critical nitrogen dilution curve for rice nitrogen status diagnosis in Northeast China. *Pedosphere*, 2018, 28: 814–822.
- [25] Zhao B, Yao X, Tian Y C, Liu X J, Ata-Ul-Karim S T, Ni J, Cao W X, Zhu Y. New critical nitrogen curve based on leaf area index for winter wheat. *Agron J*, 2014, 106: 379–383.
- [26] Zhao B, Ata-Ul-Karim S T, Yao X, Tian Y C, Cao W X, Zhu Y, Liu X J. A new curve of critical nitrogen concentration based on spike dry matter for winter wheat in Eastern China. *PLoS One*, 2016, 11: e164545.
- [27] Zhao Z G, Wang E L, Wang Z M, Zang H Z, Liu Y P, Angus J F. A reappraisal of the critical nitrogen concentration of wheat and its implications on crop modeling. *Field Crops Res*, 2014, 164: 65–73.
- [28] 强生才, 张富仓, 向友珍, 张燕, 闫世程, 邢英英. 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. *农业工程学报*, 2015, 31(17): 168–175.
- Qiang S C, Zhang F C, Xiang Y Z, Zhang Y, Yan S C, Xing Y Y. Simulation and validation of critical nitrogen dilution curve for summer maize in Guanzhong Plain during different rainfall years. *Trans CSAE*, 2015, 31(17): 168–175 (in Chinese with English abstract).
- [29] 李正鹏, 冯浩, 宋明丹. 关中平原冬小麦临界氮浓度稀释曲线和氮营养指数研究. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 177–183.
- Li Z P, Feng H, Song M D. Development and validation of critical nitrogen content curve for maize in Guanzhong area. *Trans CSAM*, 2015, 46(10): 135–141 (in Chinese with English abstract).
- [30] Bremner J M, Mulvaney C S. Nitrogen-total. In: Page A L, Miller R H, Keeney D R, eds. *Methods of Soil Analysis*. Madison: American Society of Agronomy, 1982. pp 595–624.
- [31] Yang J, Greenwood D J, Rowell D L, Wadsworth G A, Burns I G. Statistical methods for evaluating a crop nitrogen simulation model, N-ABLE. *Agric Syst*, 2000, 64: 37–53.
- [32] Jamieson P D, Porter J R, Wilson D R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Res*, 1991, 27: 337–350.
- [33] He Z Y, Qiu X L, Ata-Ul-Karim S T, Li Y D, Liu X J, Cao Q, Zhu Y, Cao W X, Tang L. Development of a critical nitrogen dilution curve of double cropping rice in south China. *Front Plant Sci*, 2017, 8: 638.
- [34] Zhao B, Niu X L, Ata-Ul-Karim S T, Wang L G, Duan A W, Liu Z D, Lemaire G. Determination of the post-anthesis nitrogen status using ear critical nitrogen dilution curve and its implications for nitrogen management in maize and wheat. *Eur J Agron*, 2020, 113: 125967.
- [35] Song L G, Wang S, Ye W J. Establishment and application of critical nitrogen dilution curve for rice based on leaf dry matter. *Agron J*, 2020, 10: 367.
- [36] 梁效贵, 张经廷, 周丽丽, 李旭辉, 周顺利. 华北地区夏玉米临界氮稀释曲线和氮营养指数研究. *作物学报*, 2013, 39: 292–299.
- Liang X G, Zhang J T, Zhou L L, Li X H, Zhou S L. Critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition index for summer maize in north China plain. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 292–299 (in Chinese with English abstract).
- [37] Yue S C, Sun F L, Meng Q F, Zhao R F, Li F, Chen X P, Zhang F S, Cui Z L. Validation of a critical nitrogen curve for summer maize in the North China Plain. *Pedosphere*, 2014, 24: 76–83.
- [38] Liang X G, Zhang Z L, Zhou L L, Shen S, Gao Z, Zhang L, Lin S, Pan Y Q, Zhou S L. Localization of maize critical N curve and estimation of NNI by Chlorophyll. *Int J Plant Prod*, 2018, 12: 85–94.
- [39] Novoa R, Loomis R. Nitrogen and plant production. *Plant Soil*, 1981, 58: 177–204.
- [40] 侯有良, Brien L O, 钟改荣. 小麦不同器官氮素累积分布动态规律的研究. *作物学报*, 2001, 27: 493–499.
- Hou Y L, Brien L O, Zhong G R. Study on the dynamic change of the distribution and accumulation of nitrogen in different plant parts of wheat. *Acta Agron Sin*, 2001, 27: 493–499 (in Chinese with English abstract).
- [41] Sinclair T R, Horie T. Leaf nitrogen, photosynthesis and crop radiation use efficiency: a review. *Crop Sci*, 1989, 29: 90–98.

- [42] 安志超, 黄玉芳, 汪洋, 赵亚南, 岳松华, 师海斌, 叶优良. 植物营养与肥料学报, 2019, 25: 123–133.
An Z C, Huang Y F, Wang Y, Zhao Y N, Yue S H, Shi H B, Ye Y L. Critical nitrogen concentration dilution model and nitrogen nutrition diagnosis in summer maize with different nitrogen efficiencies. *J Plant Nutr Fert*, 2019, 25: 123–133 (in Chinese with English abstract).
- [43] Chen Y L, Xiao C X, Chen X C, Li Q, Zhang J, Chen F J, Yuan L X, Mi G H. Characterization of the plant traits contributed to high grain yield and high grain nitrogen concentration in maize. *Field Crops Res*, 2014, 159: 1–9.
- [44] 王晓玲. 长江中下游稻麦两熟区冬小麦植株器官临界氮浓度模型构建及氮素诊断调控研究. 南京农业大学博士学位论文, 江苏南京, 2017.
Wang X L. Study on Construction Critical Nitrogen Concentration Dilution Models Based on Plant Organs and Diagnosis and Regulation of Wheat in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River. PhD Dissertation of Graduate School of Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu, China, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [45] 强生才, 张富仓, 田建柯, 吴悠, 闫世程, 范军亮. 基于叶片干物质的冬小麦临界氮浓度稀释曲线模拟研究. 农业机械学报, 2015, 46(11): 121–128.
Qiang S C, Zhang F C, Tian J K, Wu Y, Yan S C, Fan J L. Development of critical nitrogen dilution curve in winter wheat based on leaf dry matter. *Trans CSAM*, 2015, 46(11): 121–128 (in Chinese with English abstract).
- [46] Stockle C O, Debaeke P. Modeling crop nitrogen requirements: a critical analysis. *Eur J Agron*, 1997, 7: 161–169.
- [47] 刘朋召, 师祖姣, 宁芳, 王瑞, 王小利, 李军. 不同降雨状况下渭北旱地春玉米临界氮稀释曲线与氮素营养诊断. 作物学报, 2020, 46: 1225–1237.
Liu P Z, Shi Z J, Ning F, Wang R, Wang X L, Li J. Critical nitrogen dilution curves and nitrogen nutrition diagnosis of spring maize under different precipitation patterns in Weibei dryland. *Acta Agron Sin*, 2020, 46: 1225–1237 (in Chinese with English abstract).
- [48] Yuan Z F, Ata-Ul-Karim S T, Cao Q, Lu Z Z, Cao W X, Zhu Y, Liu X J. Indicators for diagnosing nitrogen status of rice based on chlorophyll meter readings. *Field Crops Res*, 2016, 185: 12–20.
- [49] Zhao B, Duan A W, Ata-Ul-Karim S T, Liu Z D, Chen Z F, Gong Z H, Zhang J Y, Xiao J F, Liu Z G, Qin A Z, Ning D F. Exploring new spectral bands and vegetation indices for estimating nitrogen nutrition index of summer maize. *Eur J Agron*, 2018, 93: 113–125.