文章编号:1000-7601(2019)04-0083-08

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.04.11

关中平原冬小麦临界氮稀释曲线建模

强生才^{1,2},张富仓^{2,3},张 燕^{1,2},闫世程²,向友珍²,李志军²

(1.山西农业大学城乡建设学院,山西 太谷 030801;2.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; 3.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100)

摘 要: 临界氮稀释曲线可诊断植株氮营养状况,针对国内目前普遍存在的建模品种单一,可能造成模型普适性偏差的问题,以陕西关中平原主栽的6个冬小麦品种为研究对象,分别设置4个(0、105、210 kg·hm⁻²和315 kg·hm⁻²)施氮量水平,以两季4个冬小麦品种田间数据,建立了冬小麦花期前地上部干物质临界氮稀释曲线,曲线服从负幂指数函数;进一步通过另外2个冬小麦品种共计两季数据对模型进行了验证,验证结果表明,采用临界氮稀释曲线可以较好地区分独立样本中的氮营养亏缺和氮营养过剩数据。依据临界氮稀释曲线建立的氮营养指数和累计氮亏缺模型,可分别用于诊断植株的氮营养状况和量化氮素盈亏量,诊断结果表明施氮量为0kg·hm⁻²和105 kg·hm⁻²条件下植株氮营养亏缺,210 kg·hm⁻²和315 kg·hm⁻²条件下小麦氮营养盈余,0~315 kg·hm⁻²施氮量下的累计氮亏缺量-33.2~50.9 kg·hm⁻²。通过建立氮营养指数与施氮量之间的线性关系,得出关中平原冬小麦适宜施氮量约为162 kg·hm⁻²。

关键词:关中平原;冬小麦;临界氮浓度;氮营养指数;累计氮亏缺

中图分类号:S512.1*1;S143.1 文献标志码:A

Determination of critical nitrogen dilution curve for winter wheat in Guanzhong Plain

QIANG Sheng-cai^{1,2}, ZHANG Fu-cang^{2,3}, ZHANG Yan^{1,2}, YAN Shi-cheng², XIANG You-zhen², LI Zhi-jun²

- (1. College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China;
- 2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education
 Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
- 3. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The critical nitrogen concentration can be used to diagnose the crop nitrogen status. At present most domestic researchers only establish the curvefor a single variety. However, establishing a universal curve based on multiple varieties can significantly improve the application of the model. Six popular varieties of winter wheat and four nitrogen levels $N_0(0)$, $N_1(105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$, $N_2(210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ and $N_3(315 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ were applied in this study. The critical nitrogen dilution curveand the accumulated nitrogen deficit model were constructed based on the aboveground dry matter from re-growth to heading stages, and the results were compared with published N_c curves. The relation ship between maximum above ground dry matter and critical N concentration of winter wheat could be described in the form of negative power function. The nitrogen nutrition index and accumulated N deficit model were further derived from the critical nitrogen dilution curve, which can be used to evaluate the nitrogen nutrition status and quantify the N deficit of winter wheat, respectively. Results show that the nitrogen nutrition index increases with the N application rate. N_0 and N_1 nitrogen application rates showed nitrogen nutrition deficiencies, but nitrogen nutrition surplus was revealed in the N_2 and N_3 treatments. When nitrogen application rate was $0 \sim 315 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, the

收稿日期:2018-07-06

修回日期:2018-10-26

基金项目:国家"十二五"863 计划项目(2011AA100504);教育部高等学校创新引智计划(B12007);山西农业大学科技创新基金(2016YJ07);山西农业大学青年科技创新基金(2016007)

作者简介:强生才(1988-),男,甘肃白银人,博士,研究方向为农业生态系统模拟研究。E-mail:qiangsc7631231@163.com

通信作者:张富仓(1962-),男,陕西武功人,教授,主要从事水肥高效利用研究。E-mail:zhangfc@nwsuaf.edu.cn

accumulated N deficit ($N_{\rm and}$) ranged from $-33.2~{\rm kg}\cdot{\rm hm}^{-2}$ to 50.9 kg $\cdot{\rm hm}^{-2}$, and increased as winter wheat grew. Through the linear fitting between NNI and N application rates, a suitable N rate of about 162 kg $\cdot{\rm hm}^{-2}$ was obtained for winter wheat in Guanzhong Plain.

Keywords: Guanzhong plain, winter wheat, critical nitrogen concentration, nitrogen nutrition index, accumulated nitrogen deficit

过量施氮并没有提高作物的产量[1],反而降低 了氮素利用效率,进而引发一系列的生态环境问 题。确定适宜的施氮量,既可保证粮食高产又可提 高氮肥利用效率[2]。临界氮浓度被定义为在一定 生长期内最大生物量时的最小氮浓度[3],是作物氮 素诊断的基本方法之一。基于干物质的临界氮稀 释曲线公式为被定义为: $N_c = a \times DM^{-b}$ 。前人研究表 明,模型参数 $(a \times b)$ 易受到品种、基因型之间的氮 效率差异和气候等因素影响[4-5]。因此,模型的应 用需进行参数的本地化研究。国外临界氮稀释曲 线常以(多年×多品种)试验数据来建立[6-8],国内相 关研究起步较晚,目前多数研究仅以1个品种建 模[9-11]。陕西关中平原是陕西省重要的粮食生产基 地,粮食产量约占全省的60%以上[12]。氮肥是粮食 增产的主要环境影响因子,但由于缺乏科学施氮技 术的指导与培训,现实生产中农民施氮量的差异很 大。常艳丽等[13]调研结果表明,关中平原冬小麦纯 N 施用量约为 210±106 kg・hm⁻², 对比本地区田间 试验结果[9,13],可以看出过量施氮和施氮量不足的 现象均存在。因此,确定适宜的施氮量对于保证区 域性粮食安全和生态环境的可持续性具有重要的 意义。基于临界氮稀释曲线在冬小麦的应用,目前 仅李正鹏[9]通过总结前人试验数据建立了该地区 冬小麦"小堰 22"品种的临界氮稀释曲线。关中地 区适宜种植的冬小麦品种繁多,前人研究表明不同 的品种在氮素吸收特性和干物质累积方面会存在 一定的差异[14],从而影响曲线的普适性。更进一 步,基于该曲线建立的累计氮亏缺模型的精度势必 会受到影响[4],并最终影响到施氮量的计算[2,4,14]。 为提高模型的通用性,建立基于多品种的冬小麦临 界氮稀释曲线很有必要。本研究意图通过建立和

验证基于多个冬小麦品种的临界氮素稀释曲线,更进一步引进累计氮亏缺模型,以量化不同施氮量条件下的累计氮亏缺量,以期为施氮量的估算提供理论和数据支持。

1 材料与方法

1.1 田间试验及采样

1.1.1 试验地概况 试验在西北农林科技大学节 水灌溉试验站进行(108°24′E、34°18′N,海拔524.7 m),该地区属于半湿润易旱区,多年平均蒸发量约 为 1 500 mm, 而降水量总体介于 550~600 mm 之 间,多年平均温度为12.9℃。试验地土壤类型为重 壤土,0~100 cm 土层土壤的田间持水量(质量分 数,下同)介于23%~25%,凋萎含水率为8.5%,表 层 20 cm 土壤的 pH 值为 8.14, 有机质含量为 12.02 g·kg⁻¹,全氮含量为 0.89 g·kg⁻¹,速效磷含量为 8.18 mg・kg⁻¹,碱解氮含量为 55.3 mg・kg⁻¹。 1.1.2 试验设计 试验分别于 2013 年 10 月-2014 年6月和2014年10月-2015年6月展开,为体现 研究结果的普适性,本研究选取了当地农民主栽的 6个冬小麦品种作为研究材料,分别设置了 N_o(0 kg • hm^{-2}) N_1 (105 kg • hm^{-2}) N_2 (210 kg • hm^{-2}) 和 N₃(315 kg·hm⁻²)共4个施氮量水平,各3次重复, 共计24个处理,各小区面积均为21 m2。氮肥选用 尿素(N含量46%),播种前和拔节期各施50%;此 外施 P₂O₅ 140 kg·hm⁻², K₂O 90 kg·hm⁻², 均作为 基肥一次性施入。各处理均采用条播种植模式,公 顷播种密度为 150 kg·hm⁻²。每季冬小麦越冬前灌 水约 25 mm;生育季严格控制病虫害和杂草的出现。 如表1所示,本研究共选取4个冬小麦品种来建立 模型,2个品种来验证模型精度。

表 1 冬小麦 N。曲线构建和验证试验

Table 1 Treatments for construction and validation of N_c curve of winter wheat

数据点分类	年份	品种	氮肥	取样次数
Classification of data points	Year	Variety	Nitrogen / (kg · hm ⁻²)	Sampling times
建模 Construction	2013-10-2014-06	小堰 22、新麦 23、轮选 988、西农 979	0 ,105 ,210 ,305	3
	2014-10-2015-06	Xiaoyan 22, Xinmai 23, Lunxuan 988, Xinong 979		
验证 Validation	2013-10-2014-06	武农 148、西农 509		
	2014-10-2015-06	Wunong 148, Xinong 509		

1.1.3 干物质和氮含量的测定 在冬小麦主要营养生长期(返青期、拔节期和花期)分别取样 1 次,各小区分别自地表以上取样 20 株(单茎),三次重复共计 60 株,在 105℃下烘 30 min,于 70℃下烘至恒重,通过如下公式计算地上部干物质:公顷地上部干物质(t·hm⁻²)= 单茎干物质(g·株⁻¹)×公顷茎秆数(株·hm⁻²)×10⁻⁶。待干物质测定完毕,采用小型粉碎机粉碎,并过 1 mm 筛,经H₂SO₄-H₂O₂消煮后采用全自动凯氏定氮仪(FOSS 2300 型)[15]测定地上部干物质的全氮含量(g·kg⁻¹)。

1.2 模型的描述

1.2.1 模型的构建和验证 研究基于 Justes 等^[16] 1994 年所定义的在某一地上部生物量下既不存在限制作物生长又不存在奢侈吸收的植株临界氮浓度来确定临界氮浓度的数据点。其中,基于干物质的临界氮稀释曲线公式如下:

$$N_c = a \times DM^{-b} \tag{1}$$

式中, N_c 代表作物的临界氮浓度(g·kg⁻¹);DM(Dry matter) 为作物地上部干物质(t·hm⁻²);参数 a 代表干物质累积量为 1 t 时的植株临界氮浓度,参数 b 为稀释曲线斜率的统计学参数。

为验证所建模型,研究通过观察已建模型能否将独立数据的氮营养亏缺和氮营养过剩数据点区分开来验证模型^[16]。更进一步,为表征模型性能,本研究通过标准化均方根误差(*n* - *RMSE*)来量化^[17]。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (s_i - m_i)^2}{n}}$$
 (2)

$$n - RMSE = \frac{RMSE}{\bar{s}} \tag{3}$$

式(2)和(3)中:n为数据点个数; s_i 和 m_i 分别为模拟和实测数值;s为实测数据均值。模型模拟性能标准:如果 $n-RMSE \geq 30\%$,则认为模拟性能较差;如果 $20\% \leq n-RMSE < 30\%$,则认为模型模拟性能一般;如果 $10\% \leq n-RMSE < 20\%$,则认为模型模拟性能较好;如果 n-RMSE < 10%,则模型模拟性能极好^[18]。

1.2.2 边界(N_{\min} 和 N_{\max}) 氮素稀释曲线的建立 选取对于冬小麦生长不受氮素限制的 N_3 施氮量处 理来建立最大氮浓度干物质曲线(N_{\max}),选取无氮 肥施人的 N_0 处理建立最小氮浓度干物质曲线(N_{\min}) [8]。

1.2.3 氮营养指数 植株的氮营养状况通过

Lemaire G^[19] 提出的氮素营养指数(Nitrogen nutrition index, NNI)进行评价:

$$NNI = N_t / N_c \tag{4}$$

式中, N_t 为地上部干物质实测氮浓度值, N_c 为相同干物质条件下氮素临界稀释曲线上的临界氮浓度值。如若计算结果 NNI > 1,则意味着植株氮素营养过剩;反之,当 NNI < 1 时为氮素营养亏缺,只有当 NNI = 1 时,才意味着植株氮营养状况适宜。

1.2.4 累计氮亏缺模型的建立 冬小麦植株的氮素吸收量 $(N_{\rm upt}, {\rm kg \cdot hm^{-2}})$ 与地上部干物质最大累计量 $({\rm Maximum\ dry\ matter}, {\rm DM}_{\rm max}, {\rm kg \cdot hm^{-2}})$ 两者之间存在如下关系:

$$N_{\rm upt} = N_c \times DM_{\rm max} \tag{5}$$

将式(5)带入式(1),即可得到冬小麦临界氮吸收模型:

$$N_{\rm upte} = 10a_c \times DM_{\rm max}^{1-b} \tag{6}$$

则冬小麦地上部累计氮亏缺模型[4,14] 为:

$$N_{\text{and}} = N_{\text{upte}} - N_{na} \tag{7}$$

式(7) 中: N_{uptc} 为临界氮吸收量(kg·hm⁻²); N_{na} 为不同施氮量条件下作物实际吸氮量(kg·hm⁻²); N_{and} 为累计氮亏缺量(kg·hm⁻²),若 N_{and} < 0,表明作物氮积累过量,反之若 N_{and} > 0之则表明作物氮营养亏缺。

1.2.5 相对产量 相对产量为冬小麦成熟期不同 施氮量条件下实际产量与最大产量的比值^[6]。

1.3 数据处理与分析

数据采用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理和计算,主要试验数据的显著性分析通过 SPSS 18.0 软件中的 LSD 多重比较法获得,显著性水平为 α = 0.05,文中图均通过 Origin 8.0 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 冬小麦临界和边界氮稀释曲线的建立及验证

2.1.1 临界氮稀释曲线的建立 如表 1 所示,本研究以两季 4 个品种的数据用于建立氮临界氮稀释曲线(n=24),从图 1 可看出,返青期(3 月 22 日)—花期(5 月 3 日),其地上部干物质变化区间为 0.84~10.43 t·hm⁻²,对应的临界氮浓度的变化区间为 1.11%~4.53%;冬小麦氮含量随地上部干物质的增加而减小。对临界氮浓度及其对应的干物质进行拟合,可以看出临界氮浓度变化趋势均服从负幂指数规律(式 8)。当干物质介于 4~5 t·hm⁻²时,实测数据点高于临界氮稀释曲线,原因为同期降雨量偏多,小麦根系活力增强加剧了小麦对土壤氮素的吸收^[26],从而提高了植株氮浓度。

2.1.2 临界氮浓度常数的确定 由于冬季气温偏低,处于返青期的冬小麦生长发育缓慢,其对水分、氮素和光热等资源的需求有限,因此作物体内的氮浓度相对稳定,不存在明显的氮稀释情况。故以临界氮浓度常数表征该阶段植株的氮营养状况^[19]。一般来说,临界氮浓度常数值为无氮素亏缺处理的植株最小氮含量与有氮素亏缺处理的植株的最大氮含量的平均值^[2]。基于此算法,本研究中冬小麦临界氮浓度常数为 4.66%,见图 1。

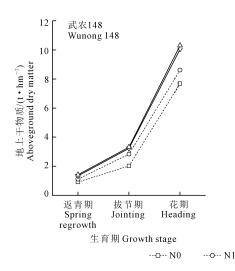
综合考虑整个营养生长期,一个完整的冬小麦临界氮稀释曲线应由植株幼小时的临界氮浓度常数和快速生长阶段的临界氮稀释曲线两部分构成,如式(8)所示。

$$N_c = \begin{cases} 4.66 & DM < 0.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \\ 4.46DM^{-0.49} & 0.84 \le DM \le 10.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \end{cases}$$
(8)

2.1.3 边界曲线的建立 施氮量的大小直接影响 植株的氮含量, N_{max} 和 N_{min} 边界曲线的建立可以量 化出冬小麦的最大氮库^[20] 和新陈代谢近乎停滞时 的植株氮含量^[21]。如图 2 所示,关中地区冬小麦的 边界氮含量曲线分别为 $N_{\text{max}} = 5.33DM^{-0.45}$ 和 $N_{\text{min}} = 2.61DM^{-0.44}$;可以看出差异主要体现在参数 a 上 (5.33% 和 2.61%),而两者氮含量的稀释速率参数 (1-b) 相近。

2.2 氮稀释曲线的验证

以武农 148 和西农 509 两个品种两季的干物质和氮浓度数据点作为独立数据(n=48)来验证模型。如图 3 所示,首先研究独立数据中施氮量对这



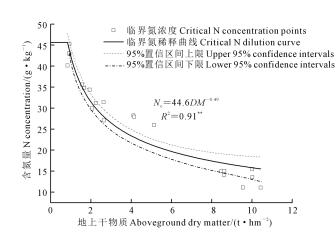


图 1 基于地上部干物质的关中平原冬小麦临界氮稀释曲线 Fig.1 Critical nitrogen dilution curve of winter wheat based on aboveground dry matter in Guanzhong Plain

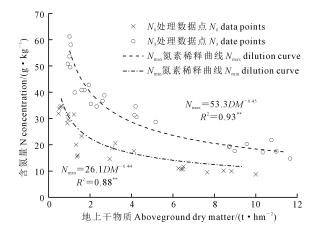


图 2 冬小麦最大、最小值氮含量稀释曲线

Fig.2 Maximum and minimum ($N_{\rm max}$, $N_{\rm min}$) nitrogen concentration dilution curve of winter wheat

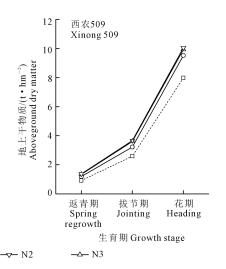


图 3 小麦品种武农 148 和西农 509 营养生长期干物质变化

Fig. 3 Changes of aboveground dry matter in Wunong 148 and Xinong 509 winter wheat varieties

两个品种干物质的显著性(p=0.05)影响,显著性分析结果如式(9)所示: N_0 施氮量下 2 个品种均为氮营养亏缺处理, N_3 施氮量下均为氮营养过剩处理,因此适宜施氮量应介于 $105\sim210~kg\cdot hm^{-2}$ 之间。

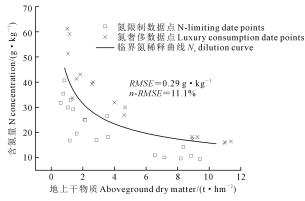
武农
$$148: DM_0 < DM_1 < DM_2 = DM_3$$
 (9)
西农 $509: DM_0 < DM_1 = DM_2 = DM_3$

式中, DM_0 、 DM_1 、 DM_2 和 DM_3 分别为 0、105、210 kg · hm⁻²和 315 kg· hm⁻²施氮量下的小麦干物质。

其次,依据临界氮稀释曲线(公式 8)能否区分独立数据中的氮营养亏缺和氮营养过剩数据来验证模型^[2],如图 4 所示,氮营养亏缺数据总体处于 N_c 曲线下部,而氮营养过剩数据总体处于 N_c 曲线上部。此外,笔者通过标准化的均方根误差(n-RMSE)来评估模型的性能,经计算 n-RMSE=11.1%,表明模型达到较好水平。因此,本研究所建模型可进一步用来诊断植株的氮营养状况以及推导累计氮亏缺模型。

2.3 氮营养指数

生产实践中,只需将实测冬小麦地上部干物质带入临界氮稀释曲线(式8),即可查到植株体的临界氮浓度,将该值与同期植株实测氮浓度相比,就可以反映出作物的氮营养盈亏状态。为了量化氮素盈亏程度,本研究通过氮营养指数(NNI)来表征,从图 5 可以看出,NNI 随施氮量(N_{apply})的增加而增加, N_0 、 N_1 、 N_2 和 N_3 施氮量下的 NNI 值变化区间依次为 $0.56 \sim 0.72$ 、 $0.78 \sim 0.99$ 、 $1.02 \sim 1.26$ 和 $1.18 \sim 1.45$ 。依据 NNI = 1 时植株氮营养适宜的原则,则陕西关中平原冬小麦最佳施氮量应介于 $105 \sim 210$ kg · hm⁻²之间。



注:RMSE、n-RMSE 分别为均方根误差和标准化均方根误差。

Note: RMSE and n-RMSE are root mean square of error and standardized root mean square of error.

图 4 独立数据校验临界氮稀释曲线

Fig.4 Validation of N_c curve using independent date points

由于所得最佳施氮量区间过大,不便于指导生产实践。为此,对图 5 中的数据点行进线性拟合,得到NNI 与施氮量(N_{apply})之间的拟合方程,如公式(10)所示。假定 NNI=1,则其对应的施氮量为 162 kg·hm⁻²,该值即为陕西关中平原基于冬小麦最大干物质条件下的适宜施氮量。

$$NNI = 0.00216N_{apply} + 0.65$$
 $R^2 = 0.98$ ** (10)
2.4 累计氮盈亏缺模型的建立

相同干物质条件下的作物临界氮吸收量(N_{uptc})与实际氮吸收量(N_{na})两者的差值即为氮素亏缺量(N_{and})。本研究通过 2 季 4 个品种计算了 6 次取样时间下的平均累计氮亏缺量(图 6),其累计氮亏缺量总体介于-33.2~50.9 kg·hm⁻²之间;其中,在 N_0 和 N_1 施氮量下冬小麦植株均存在氮素亏缺状态,而在 N_2 和 N_3 施氮量下均表现出氮素的盈余,总体而言随着施氮量的增加植株的氮营养状况由亏缺转向盈余,因此适宜的施氮量总体介于 $105~210~kg·hm^{-2}$ 之间;变化趋势与银敏华[22]和 Yao等[21 研究所

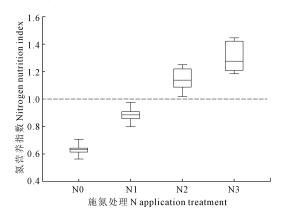


图 5 施氮量与氮营养指数的关系

Fig.5 Relationship between N application and N nutrition index

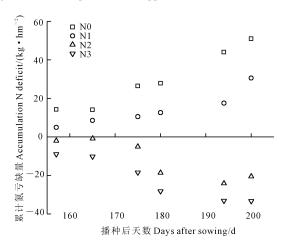


图 6 冬小麦营养生长期不同氮水平下氮素累计亏缺量

Fig.6 Accumulated N deficit ($N_{\rm and}$) under different N application in different growth stages of winter wheat

得相近。更进一步,将已建立的冬小麦临界氮稀释曲线式(8)带入式(7)即得到陕西关中平原基于多品种条件下的冬小麦累计氮亏缺模型:

$$N_{\text{and}} = 44.6DM_{\text{max}}^{0.51} - 0.001N_t \times DM \tag{11}$$

2.5 氮营养指数与累计氮亏缺量的关系

通过建立氮营养指数和累计氮亏缺量之间的 关系,可以更加量化植株的氮营养状况,如图 7 所 示,两者之间呈负相关性,即随着氮营养指数(NNI) 的增加累计氮亏缺量呈降低趋势,两者之间的关系 式可用如下线性公式表示:

$$N_{\text{and}} = 84.8 - 87.0 NNI \quad R^2 = 0.99 \tag{12}$$

2.6 氮营养指数与冬小麦相对产量的关系

通过建立两季 4 个品种冬小麦氮营养指数 (NNI) 与相对产量(RY) 的关系(图 8),可看出当氮营养指数大于或者小于 1 时,相对产量均不是最大,而当 NNI 约等于 1 时 RY 最大。本研究进一步建立了冬小麦 RY 与 NNI 的表达式为:

 $RY = -0.78NNI^2 + 3.26NNI - 1.49$ $R^2 = 0.88 (13)$

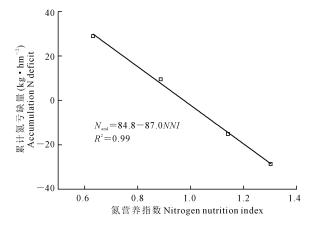


图 7 氮营养指数与累计氮亏缺量之间的关系 Fig.7 Relationship between N nutrition index and accumulated N deficit

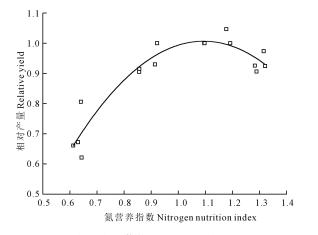


图 8 冬小麦氮营养指数与相对产量的关系 Fig.8 Relationship between N nutrition index and relative yield

3 讨论

3.1 小麦临界氮稀释曲线模型的比较与分析

本研究基于冬小麦营养生长期地上干物质建 立和验证了陕西关中平原冬小麦临界氮稀释曲线, 其表达式为 $N_c = 4.46DM^{-0.49}$, 植株氮含量服从干物 质的负幂指数变化趋势。Justes E^[16]在法国建立了 基于地上部干物质的冬小麦临界氮稀释曲线模型, 其模型为 $N_c = 5.35 DM^{-0.44}$,模型参数与本研究相比 较存在较大差异,产生差异的可能原因如下: 1) Justes E 已建模型所选品种的氮素吸收效率高于 本研究,从而导致参数 a 明显偏大;(2) 关中地区冬 小麦营养生长期气温高于法国同期,基于积温学原 理,法国冬小麦生育期较关中地区长约40 d[23],生 育期的延长意味着法国地区所种植的冬小麦氮素 的吸收量大于陕西关中地区[24],从而导致植株氮含 量增加和氮素稀释过程变缓。本研究进一步与李 正鹏^[9]在关中地区建立的小堰 22 的氮稀释曲线 N。 =4.64DM-0.46进行了比较,结果表明本研究模型参 数 a 值略低, b 值略高。参数 a 表征的是作物生长 发育缓慢时期作物的内在需氮特性[25],本研究参数 a 值较低,这可能与品种之间在氮素吸收效率方面 的差异有关[27-28],由于缺乏本研究中所选品种氮效 率特性参数的相关文献,推测的结果是本研究所选 冬小麦品种的氮素吸收效率整体偏低,进而降低了 a值,这与赵犇^[29]等通过分别建立两种蛋白含量小 麦 N_c曲线,发现这与低蛋白品种参数 a 值较低的结 论一致。就参数 b 而言,其描述的是植株氮含量随 干物质增加的递减关系,其大小主要决定于氮素吸 收量与干物质之间的相对关系[29],本研究参数 b 值 略高,这表明其氮素稀释效应更加明显,可能的原 因是本研究在返青期后无灌溉,导致的作物根系活 力的降低[26],进而导致氮素吸收量降低有关[33],而 李正鹏[9]研究中部分实验有灌溉条件,这会导致其 同期冬小麦氮素吸收量高于本研究,从而减缓了氮 素的稀释过程。

3.2 氮营养状况与适宜施氮量的确定

植株氮营养状况评价主要有两种方法: (1) 依据实测植株氮含量与临界氮含量的大小关系来确定^[2],如图 4 所示,如果实测值位于 N_c 曲线之上,则表明氮素盈余,如果实测氮含量位于 N_c 曲线之下,则表明植株体氮素亏缺;如果实测氮含量位于 N_c 曲线上,则说明氮营养适宜,是基于高产条件下对环境影响最小的最佳施氮量^[30]; (2) 通过氮营养指数 (NNI) 可以进一步量化氮素盈亏程度^[19],通过比较

NNI 与数值"1"的大小关系来判断^[14],如图 5 所示,4 个施氮量下的 NNI 均值依次为 0.64、0.88、1.14 和 1.31。可以看出施氮量小于 105 kg·hm⁻²时冬小麦总体呈现氮素亏缺状态,而当施氮量大于 210 kg·hm⁻²时总体呈现氮素盈余状态。当 NNI=1 时,施氮量最优,通过进一步拟合得出关中平原冬小麦适宜施氮量约为 162 kg·hm⁻²,模拟结果与李正鹏^[9]模拟结果相近,试验结果与同延安^[31] 和赵俊晔^[32]等的田间试验结果总体吻合,表明所建模型具有一定的可靠性。另一方面,由于本研究氮肥施入量梯度较大,这就会造成指导生产实践的参考性不强,因此,有必要通过多设置几个施氮量水平来降低不确定性。

3.3 累计氮亏缺模型的应用

本研究基于临界氮稀释曲线建立了冬小麦累计氮亏缺模型。当施氮量为 105 kg·hm⁻²和 210 kg·hm⁻²时,其累计氮亏缺曲线与参照线"0"最近,这表明适宜的施氮量介于 105~210 kg·hm⁻²之间。就累计氮亏缺模型的应用而言,有学者通过建立 NNI、N_{and}与施氮量(N_{apply})两者变化量之间的关系来估算适宜的施氮量^[8,14];还有学者将累计氮亏量与氮素利用效率结合起来估算施氮量^[4,34]。但是基于临界氮稀释曲线诊断作物氮营养状况需要测定植株的氮含量,目前主要通过测定干物质及其氮浓度来实现,该方法费时费力应用起来存在一定困难^[9]。伴随着高精度和快速的植株氮营养诊断技术的不断发展,应用累计氮亏缺量模型估算施氮量可为定量化的氮肥调控提供一种很好的手段。

4 结 论

- 1)本研究以陕西关中平原 4 个冬小麦品种建立了其临界氮稀释曲线模型,临界氮浓度服从地上部干物质的负幂律函数。进一步用 2 个品种数据验证了模型的精度,其 n-RMSE = 11.1%,达到较好水平,能较好地区分氮限制和氮奢侈数据点。
- 2)基于临界氮稀释(N_c)曲线建立的氮营养指数(NNI)可用来诊断冬小麦的氮营养盈亏状态,诊断结果表明,施氮量小于 105 kg·hm⁻²时,其 NNI<1,而施氮量大于 210 kg·hm⁻²时,其 NNI>1,拟合结果表明关中地区冬小麦适宜施氮量约为 162 kg·hm⁻²。
- 3)本试验通过冬小麦临界氮稀释曲线进一步 计算了不同施氮量下关中平原冬小麦公顷累计氮 盈亏量,从而量化了氮素盈亏量;此外建立的累计 氮亏缺模型,可在未来用于植株氮素亏缺下的施氮 量估算。

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]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
- [2] Yao X, Zhao B, Yong C T, et al. Using leaf dry matter to quantify the critical nitrogen dilution curve for winter wheat cultivated in eastern China [J]. Field Crops Research, 2014, 159;33-42.
- [3] Ziadi N, Brassard M, Bélanger G, et al. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for corn in eastern canada [J]. Agron J, 2008, 100(2):271-276.
- [4] 赵犇,姚霞,田永超,等. 基于临界氮浓度的小麦地上部氮亏缺模型 [J]. 应用生态学报,2012,23(11):3141-3148.
- [5] Sheehy J E, Pons L, Werger M J A, et al. Critical nitrogen concentrations: implications for high-yielding rice cultivars in tropics [J]. Field Crops Research , 1998, 59(1):31-41.
- [6] P. Debaeke, E.J. van Oosterom, E. Justes, et al. A species-specific critical nitrogen dilution curve for sunflower (*Helianthus annuus* L.)
 [J]. Field Crops Research, 2012, 136:76-84.
- [7] Mo´nica G. Agnusdei Silvia G. Assuero Fernando A, et al. Critical N concentration can vary with growth conditions in forage grasses; implications for plant N status assessment and N deficiency diagnosis [J]. Nutrient cycling in Agroecosystems, 2010, 88(2):215-230.
- [8] 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.
- [9] 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]. 农业机械学报,2015,46(10):177-183, 283.
- [10] 薛晓萍,陈兵林,郭文琦,等. 棉花临界需氮量动态定量模型[J]. 应用生态学报,2006,17(12):2363-1270.
- [11] 王新,马富裕,刁明,等. 滴灌番茄临界氮浓度、氮素吸收和氮营养指数模拟[J]. 农业工程学报,2013,29(18):99-108.
- [12] 张保军,张正茂,李思训,等. 提升陕西省小麦生产能力的区域分析[J]. 麦类作物报,2009,29(4);701-705.
- [13] 常艳丽.关中平原冬小麦/夏玉米轮作体系施肥现状调查及施肥推荐[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [14] 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.
- [15] Horowitz W. Official methods of analysis [M]. Washington, DC; AOAC, 1970;17-18.
- [16] Justes E, Mary B, Meynard J M, et al. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter-wheat crops [J]. Annals of Botany, 1994, 74(4):397-407.
- [17] Willmott C J. Some comments on the evaluation of model performance
 [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1982, 63(11):
- [18] Jamieson P D, Porter J R, Wilson D R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zea land
 [J]. Field Crops Research, 1991, 27(4):337-350.
- [19] Lemaire G, Gastal F. N uptake and distribution in plant canopies [C]//Diagnosis of the nitrogen status in crops. Heidelberg; Springer-verlag publishers, 1997;3-43.
- [20] Gayler S, Wang E, Priesack E, et al. Modeling biomass growth, Nuptake and phenological development of potato crop [J]. Geoderma.

- 2002, 105(3/4):367-383.
- [21] Zhao B. Determining of a critical dilution curve for plant nitrogen concentration in winter barley [J]. Field Crops Research, 2014, 160: 64-72
- [22] 银敏华,李援农,谷晓博,等.氮肥运筹对夏玉米氮素盈亏及利用的 影响[J]. 农业机械学报, 2015,46(10):167-175.
- [23] Zhou Y, He Z H, Sui X X, et al. Genetic improvement of grain yield and associated traits in the northern China winter wheat region from 1960 to 2000[J]. Crop Science, 2007,47(1):245-253.
- [24] Pommel B, Gallais A, Coque M, et al. Carbon and nitrogen allocation and grain filling in three maize hybrids differing in leaf senescence [J]. European journal of agronomy, 2006, 24(3):203-211.
- [25] Lemaire G, Van O E, Sheehy J, et al. Is crop N demand more closely related to dry matter accumulation or leaf area expansion during vegetative growth [J]. Field Crops Research, 2007, 100(1):91-106.
- [26] 刘小刚,张富仓,杨启良,等. 玉米叶绿素、脯氛酸、根系活力对调 亏灌溉和氮肥处理的响应[J]. 华北农学报,2009,24(4):106-111.
- [27] 王敬锋,刘鹏,赵秉强,等. 不同基因型玉米根系特性与氮素吸收利用的差异[J]. 中国农业科学,2011,44(4):699-707.

- [28] Foulkes M J, Hawkesford M J, Barraclough P B, et al. Identifying traits to improve the nitrogen economy of wheat: Recent advances and future prospects [J]. Field Crops Research, 2009, 114(3) 329-342.
- [29] Caloin M, Yu O. Analysis of the time course of change in nitrogen content in Dactylis glomerata L. using a model of plant growth [J]. Annals of Botany, 1984, 54(1):69-76.
- 30] Cui Z L, Chen X P, Miao Y X, et al. On-farm evaluation of the improved soil Nmin-based nitrogen management for summer maize in North China Plain [J]. Agronomy Journal, 2008, 100(3):517-525.
- [31] 同延安,赵营,赵护兵,等. 施氮量对冬小麦氮素吸收、转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(1):64-69.
- [32] 赵俊晔,于振文. 不同土壤肥力条件下施氮量对小麦氮肥利用和土壤硝态氮含量的影响[J]. 生态学报,2006,26(3):815-822.
- [33] 邢英英,张富仓,张 燕,等. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J]. 农业工程学报,2014,30(21):70-80.
- [34] Ata-Ul-Karim S T, Liu X J, Lu Z Z, et al. In-season estimation of rice grain yield using critical nitrogen dilution curve [J]. Field Crops Research, 2016, 195:1-8.

(上接第82页)

- [15] 黄婷苗,王朝辉,侯仰毅,等. 施氮对关中还田玉米秸秆腐解和养分释放特征的影响[J]. 应用生态学报,2017,28(7);2261-2268.
- [16] 刘春增,李本银,吕玉虎,等.紫云英还田对土壤肥力、水稻产量及其经济效益的影响[J].河南农业科学,2011,40(5):96-99.
- [17] Sharma A R, Behera U K. Nitrogen contribution through Sesbania, green manure and dual-purpose legumes in maize - wheat cropping system; agronomic and economic considerations [J]. Plant & Soil, 2009, 325(1-2);289-304.
- [18] 李可懿,王朝辉,赵护兵等.黄土高原旱地小麦与豆科绿肥轮作及施氮对小麦产量和籽粒养分的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):110-123.
- [19] 赵娜,赵护兵,曹群虎,等. 渭北旱区夏闲期豆科绿肥对土壤肥力性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2):124-128.
- [20] Li-xia, He-shui, Li-mei, et al. Non-leguminous winter cover crop and nitrogen rate in relation to double rice grain yield and nitrogen uptake in Dongting Lake Plain, Hunan Province, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(11):2507-2514.
- [21] 陈光荣,王立明,杨如萍,等.甘肃不同生态区豆科与非豆科间套作高效栽培技术及其应用前景[J].中国农业科技导报,2017,19(3):63-71.
- [22] 祁军,郑伟,张鲜花,等. 不同豆禾混播模式的草地生产性能[J]. 草业科学, 2016, 33(1);116-128.
- [23] Xu X , Hirata E , Enoki T , et al. Leaf litter decomposition and nutrient dynamics in a subtropical forest after typhoon disturbance [J]. Plant Ecology, 2004, 173(2):161-170.
- [24] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposition in ecological systems[J]. Ecology, 1963, 44;322-333.
- [25] Lupwayi N Z, Clayton G W, O Donnovan J T, et al. Decomposition of crop residues under conventional and zero tillage [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2004, 84(4):403-410.
- [26] 宁东峰, 马卫萍, 孙文彦, 等. 华北地区棉田翻压冬绿肥腐解及

- 养分释放规律研究[J]. 华北农学报, 2011, 26(6):164-167.
- [27] Ferreira P A A, Girotto E, Trentin G, et al. Biomass decomposition and nutrient release from black oat and hairy vetch residues deposited in a vineyard[J]. Revista Brasileira De Ciência Do Solo, 2014, 38 (5):1621-1632.
- [28] Heal O W, Anderson J M, Swift M J.Plant litter quality and decomposition: An historical overview [C]//Cadisch G, Giller K E.Driven by nature: Plant Litter Quality and Decomposition. Wallingford: CAB International, 1997: 3-30.
- [29] Lynch M J, Mulvaney M J, Hodges S C, et al. Decomposition, nitrogen and carbon mineralization from food and cover crop residues in the central plateau of Haiti[J]. Springer plus, 2016, 5(1):973.
- [30] 牟小翎, 董浩, 夏光利,等. 两种不同绿肥作物的腐解及养分释放特征研究[J]. 山东农业科学, 2015,47(9):94-97.
- [31] Poffenbarger H J, Mirsky S B, Weil R R, et al. Legume Proportion, Poultry Litter, and Tillage Effects on Cover Crop Decomposition [J]. Agronomy Journal, 2015, 107(6):2083-2096.
- [32] Blanco-Canqui H, Claassen M M, Presley D R. Summer Cover Crops Fix Nitrogen, Increase Crop Yield, and Improve Soil - Crop Relationships [J]. Agronomy Journal, 2012, 104(1):137-147.
- [33] Shah Z, Ahmad S R, Latif, et al. Rice wheat yields in relation to biomass of green manure legumes [J]. Sarhad Journal of Agrichuture, 2011, 27(1):73-84.
- [34] 张久东,包兴国,胡志桥,等.绿肥与化肥配施对小麦产量和土壤肥力的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(6):125-129.
- [35] Ledgard S F. Nitrogen cycling in low input legume-based agriculture, with emphasis on legume/grass pastures[J]. Plant & Soil, 2001, 228 (1):43-59.
- [36] Sievers T, Cook R L. Aboveground and Root Decomposition of Cereal Rye and Hairy Vetch Cover Crops [J]. Soil Science Society of America Journal, 2018, 82(1):147-155.