

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.017

基于叶片干物质的冬小麦临界氮稀释曲线模拟研究*

强生才^{1,2} 张富仓^{2,3} 田建柯¹ 吴悠¹ 闫世程¹ 范军亮¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

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: 过量施氮现象在陕西省关中平原非常突出, 采用简单有效的作物施氮量估算技术, 可实现生产成本降低和生态环境改善的双重目的。临界氮浓度可用于诊断作物氮营养状况, 前人多基于地上部干物质建立临界氮素稀释曲线, 而本研究以叶片干物质建立该曲线。试验设 6 个冬小麦品种和 4 个氮素 (N_0 、 N_1 、 N_2 和 N_3) 水平, 以两季 (2013—2015 年) 田间数据构建和验证了基于叶片干物质的冬小麦营养生长期临界氮稀释曲线, 经拟合, 叶片的临界氮浓度与叶片最大干物质符合负幂函数关系, 依据临界氮稀释曲线推导的氮营养指数可评价冬小麦的氮营养状况。结果表明, 氮营养指数随施氮量的增加而增加, 其值介于 0.57 ~ 1.21 之间, 建立的相对产量与氮营养指数关系表明, 关中平原适宜的施氮量介于 105 ~ 210 kg/hm² 之间。基于叶片干物质的临界氮稀释曲线模型可以很好地评估植株体的氮营养状况, 用以指导该区域冬小麦的科学施氮。

关键词: 关中平原 冬小麦 叶片干物质 氮肥 临界氮浓度 氮营养指数

中图分类号: Q945.1; S512.1⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0121-08

Development of Critical Nitrogen Dilution Curve in Winter Wheat Based on Leaf Dry Matter

Qiang Shengcai^{1,2} Zhang Fucang^{2,3} Tian Jianke¹ Wu You¹ Yan Shicheng¹ Fan Junliang¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, 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 Guanzhong Plain of Shaanxi Province is one of the major regions of wheat production in China. Farmers believe that the more nitrogen is applied, the higher yield is obtained. In fact, the excessive application of nitrogen fertilizer does not increase the yield of wheat synchronously, but cause a series of environmental issues. A simple but effective technique for crop nitrogen estimation can lower the production cost and improve the ecological environment. The critical nitrogen concentration can be used to diagnose the crop nitrogen status. Previous researchers mainly developed the critical nitrogen dilution curve based on the aboveground dry matter, whilst the leaf dry matter was used to establish the curve in this study. The field experiments were conducted between 2013 and 2015 to construct and validate the critical nitrogen dilution curve based on leaf dry matter in the vegetative stage in winter wheat. In this study, we selected six winter wheat varieties and set four nitrogen levels N_0 (0), N_1 (105 kg/hm²), N_2 (210 kg/hm²) and N_3 (315 kg/hm²). Results showed that there were negative power relationships between the critical nitrogen concentration and the maximum leaf dry matter. The nitrogen nutrition index

收稿日期: 2015-08-02 修回日期: 2015-09-08

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA100504)和高等学校创新引智计划(111 计划)资助项目(B12007)

作者简介: 强生才, 博士生, 主要从事农业生态系统模拟研究, E-mail: qiangsc7631231@163.com

通讯作者: 张富仓, 教授, 博士生导师, 主要从事水肥高效利用研究, E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

derived from the critical nitrogen dilution curve could be used to evaluate the nitrogen nutrition status of winter wheat. The nitrogen nutrition index increased with the nitrogen rate, with the values between 0.57 and 1.21. The relation between nitrogen nutrition index and relative yield indicate that 105 ~ 210 kg/hm² was the optimal nitrogen rate for winter wheat in the Guanzhong Plain. The critical nitrogen dilution curves based on leaf dry matter were successfully used to assess of the nitrogen nutrition status of winter, which can be used for guiding scientific application and diagnose of nitrogen in Guanzhong Plain.

Key words: Guanzhong Plain Winter wheat Leaf dry matter Nitrogen fertilizer Critical nitrogen concentration Nitrogen nutrition index

引言

氮肥在我国粮食增产方面发挥了巨大作用^[1],但作物产量并不随施氮量的增加而同步增加,甚至还降低^[2],导致生产成本增加的同时还诱发了一系列环境问题,如温室气体排放加剧^[3]、土壤酸化^[4]以及水体污染^[5-6],这促使人们更多关注科学施氮和氮营养诊断,以达到同步降低成本和保护环境的目。光谱遥感^[7]、测土施肥术^[8]以及叶绿素测定^[9]等技术可指导农田系统精确施氮,但受制于资金和技术普及程度等因素的限制,大面积推广存在诸多困难,因此,探索简单实用的科学施氮技术很有必要。

临界氮稀释曲线(N_c)是基于干物质或者特定组织器官(茎和叶)而建立的,是氮营养诊断的手段之一^[10],为了提高模型的普适性,Greenwood等^[11]在大量试验的基础上建立了C3和C4作物通用模型,但该模型是基于多个试验的平均值,当模型应用到一个新的气候区域时作物品种参数会存在一定差异^[12-13],因此,需要进行参数的本地化研究。

就小麦而言,前人基于地上部干物质(DM)建立了冬小麦^[12,14-16]和春小麦^[17]的 N_c 曲线,而事实上植株体的叶片才是作物生长的中心问题,是光合组织的重要器官,组织器官的干物质分配和氮营养都是围绕满足叶片的生长发育所进行的,叶片干物质(LDM)和叶氮含量的大小与光合特性之间存在显著的正相关^[15],通常情况下胁迫环境会改变干物质在各组织器官的分配过程,因此临界氮稀释曲线会随组织器官的不同而不同^[18]。围绕该诊断方法,Yao等^[15]在南京建立了基于LDM的冬小麦 N_c 曲线,证明了该曲线可用于植株体的氮营养诊断。关中平原是陕西省重要的粮食生产基地,其小麦产量占全省的60%以上。然而,当地农民盲目过量施氮现象已相当普遍,小麦产量并没有同步增加,反而增加了生产成本,引发了一系列环境问题^[19],因此指导农民科学施氮很有必要。目前,该区域仅李正鹏等^[16]通过总结前人试验数据建立了基于DM的 N_c

曲线,而无人建立基于LDM的 N_c 曲线。

针对以上问题,本研究以2013年和2014年6个品种的冬小麦田间数据建立并验证陕西省关中平原基于LDM的临界氮素稀释曲线,诊断不同施氮量下的冬小麦氮营养状况,以期为陕西省关中地区多个品种的冬小麦精确施氮提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 田间试验及采样

1.1.1 试验地概况

本试验在西北农林科技大学节水灌溉试验站进行,该试验站位于东经108°24',北纬34°20',海拔高度524.7 m,属于暖温带季风半湿润气候区,年平均气温为12.9℃,多年平均降水量为550~600 mm(主要集中在7—9月份),年平均蒸发量1500 mm。该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%,凋萎含水率为8.5%(以上均为质量含水率),0~20 cm土层的土壤pH值为8.14,有机质质量比为12.02 g/kg,全氮质量比为0.89 g/kg,速效磷质量比为8.18 mg/kg,碱解氮质量比为55.3 mg/kg。

1.1.2 试验设计

试验分别于2013年和2014年(当年10月一次年6月)在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室试验田中展开,试验选取当地农民主栽的6个冬小麦品种,分别设置 N_0 (0 kg/hm²)、 N_1 (105 kg/hm²)、 N_2 (210 kg/hm²)、 N_3 (315 kg/hm²)4个氮素水平,3次重复,共计24个处理,各处理之间随机区组排列。其中 N_1 、 N_2 施氮量处于关中地区推荐的适宜施氮量区间中, N_3 为当地农民最大施氮量;氮肥播种之前基施50%(尿素,含N46%),剩余50%在拔节期一次性施完,此外施 P_2O_5 140 kg/hm², K_2O 90 kg/hm²,均作为基肥一次性施入,小区面积为21 m²(3 m×7 m);播种密度为150 kg/hm²,于同年10月17日播种,次年约6月9日收获,每季越冬前灌水25 mm,保证冬小麦顺利过冬,病虫害和除草等其他田间管理措施参照当地农民习惯进行。试验

详情及设计如表 1 所示。

表 1 冬小麦 N_c 曲线构建和验证试验处理

Tab. 1 Treatments for constructing and validating N_c curve of winter wheat

数据点 分类	年份	品种	施氮量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
建模	2013-10—2014-06	小堰 22, 西农 979,	
	2014-10—2015-06	轮选 988	0, 105,
验证	2013-10—2014-06	武农 148, 西农	210, 315
	2014-10—2015-06	509, 新麦 23	

1.1.3 干物质和氮含量测定

对于冬小麦(返青期、拔节期、花期)破坏性取样 3 次, 每小区取样 20 株, 3 次重复, 共计 60 株, 茎叶分离后, 单株叶片干物质乘以公顷分蘖数即可得公顷叶片干物质(kg/hm^2)。

单独将叶片在 105°C 下干燥 30 min, 接着在 70°C 下干燥至恒质量, 最后用小型粉碎机粉碎过 1 mm 筛, 经 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 消煮后通过 FOSS 2300 型全自动凯氏定氮仪测定叶片全氮含量^[20]。

1.1.4 产量测定

收获时各小区选取 1 m^2 , 3 次重复单打单收计产, 以 3 个小区实测产量的平均值计算处理产量, 最后折合为公顷产量(kg/hm^2)。

1.2 模型描述

1.2.1 曲线构建和验证

构建基于干物质的氮素稀释曲线关键是找出临界数据点: 即对作物生长既不起限制作用也不起促进作用的数据点。氮素限制处理被定义为增加氮肥会显著增加干物质累积量; 不缺氮处理被定义为施氮不会增加干物质累积量, 但是会显著增加植株体含氮量。各处理之间的显著性差异通过 (SPSS, Inc) 分析确定, 显著性水平设定为 $P = 0.05$ 。

构建基于干物质的临界氮素稀释曲线的步骤^[21]为: ①每次取样测定其干物质及其相应氮浓度, 通过方差分析对作物干物质是否受氮素营养限制进行分类。②对于作物生长受限制的数据, 其地上部干物质和氮浓度通过线性关系拟合。③对于作物生长不受氮素限制的处理, 使用其地上部干物质的最大值。④每次取样时的理论临界氮浓度由受氮限制阶段线性曲线与不受氮限制阶段线性曲线交点的纵坐标决定。其中基于叶片干物质的临界氮稀释曲线公式为

$$N_c = aR_{\text{LDM}}^{-b} \quad (1)$$

式中 N_c ——作物的临界氮质量分数, %

R_{LDM} ——叶片干物质, t/hm^2

a ——作物叶片干物质为 1 t 时的临界氮浓度^[22], %

b ——临界氮浓度稀释曲线斜率^[23]

模型的验证采用均方根误差 RMSE (Root mean square error) 和标准化均方根误差 (n -RMSE)^[24-25] 来校验模型精度, 此外通过建立模拟值和实测值之间 1:1 的直方图来直观显示模型的拟合度和可靠性。RMSE 和 n -RMSE 的计算公式分别为

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

$$R_{n\text{-RMSE}} = \frac{R_{\text{RMSE}}}{\bar{s}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 s_i, m_i ——模拟值和实测值

n ——数据个数

\bar{s} ——实测数据的平均值

R_{RMSE} 用带单位的值来度量模拟值和实测值的平均差异, R_{RMSE} 值越小, 表明模拟值和实测值一致性越好, 偏差越小; $R_{n\text{-RMSE}}$ 消除了单位, 能用来比较不同单位数据的模型性能。一般认为, 如果 $R_{n\text{-RMSE}} < 10\%$, 则模型模拟性能极好; 如果 $10\% < R_{n\text{-RMSE}} < 20\%$, 则认为模型模拟性能较好; 如果 $20\% < R_{n\text{-RMSE}} < 30\%$, 则认为模型模拟性能一般; 如果 $R_{n\text{-RMSE}} > 30\%$, 则认为模拟性能较差^[26]。

此外, 为了界定叶片氮含量的变异性, 本研究以 N_3 施氮量下两季数据点 ($n = 18$) 来建立最大氮浓度曲线^[27] (N_{max}), 另外以 N_0 施氮量两季数据点 ($n = 18$) 建立最小氮浓度曲线 (N_{min})。

1.2.2 氮营养指数及其与相对产量的关系

为量化作物的氮素营养状况, 本研究采用氮营养指数 (Nitrogen nutrition index, NNI) 来评价, 其表达式为

$$R_{\text{NNI}} = N_i / N_c \quad (4)$$

式中 N_i ——叶片氮浓度实测值, %

R_{NNI} 反映作物体内氮素的营养状况, $R_{\text{NNI}} = 1$, 氮营养状况适宜; $R_{\text{NNI}} > 1$, 氮素营养盈余; $R_{\text{NNI}} < 1$, 氮素营养亏缺。相对产量为夏玉米成熟期不同氮处理条件下实际产量与最大产量的比值^[28]。

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2003 进行数据的基础整理和误差计算, 主要指标的显著性通过 SPSS 18.0 软件中的 LSD 多重比较法获得, 显著性水平设定为 $P = 0.05$, 图形通过 Origin 8.0 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 构建基于叶片干物质的临界氮稀释曲线

2.1.1 基于叶片干物质的临界氮稀释曲线

本研究以 2013 年和 2014 年(当年 10 月一次年 6 月)3 个品种(小堰 22、西农 979、轮选 988)冬小麦 3 次采样(返青期、拔节期、花期)的临界氮含量及其对应最大叶片干物质数据点($n = 18$)来构建模型,两季冬小麦的 LDM 介于 $0.56 \sim 2.62 \text{ t/hm}^2$,叶片临界氮质量分数介于 $3.35\% \sim 4.32\%$,如图 1 所示,从返青期到花期随着 LDM 的增加,叶片氮含量呈现出下降的趋势。

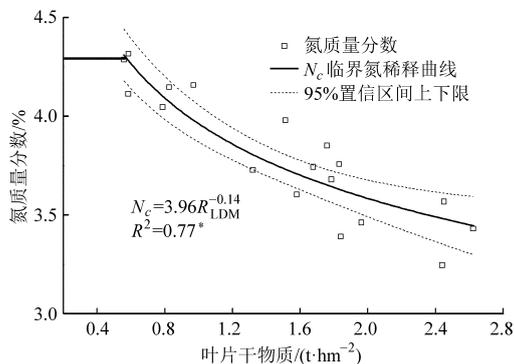


图 1 基于叶片干物质的冬小麦临界氮稀释曲线

Fig.1 Critical nitrogen dilution curves of winter wheat based on leaf dry matter

2.1.2 临界氮浓度常数

在生育初期植株生物量累积少,作物对水、肥、

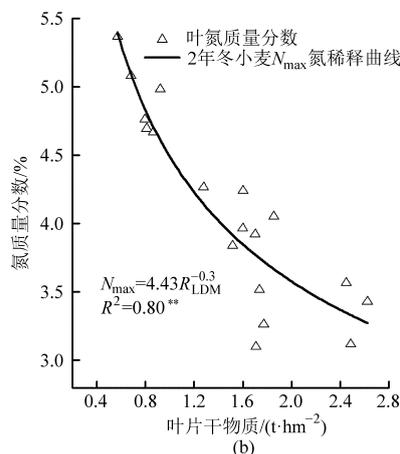
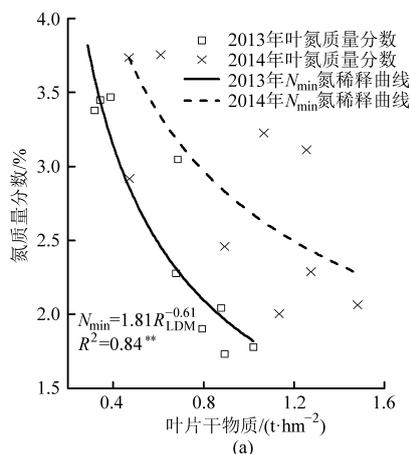


图 2 冬小麦叶片氮浓度的最大、最小值(N_{\max} , N_{\min})氮稀释曲线

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

2.2 氮素临界稀释曲线校验

模型校验采用独立的数据点,本研究选取剩余 2 年 3 个冬小麦品种(新麦 23、武农 148 和西农 509)3 次采样(返青期、拔节期和花期)的临界氮浓度和其最大叶片干物质数据点($n = 18$)来校验模型,将独立数据组中的最大干物质代入 N_c 曲线后对比模拟值和实测值,通过 1:1 的直方图来直观显示

光等资源的利用量不存在明显的竞争,即使生物量增加也不会明显降低植株氮含量,故生育初期采用氮素临界稀释曲线拟合并不合理。为此采用临界氮浓度常数,其数值为无氮素亏缺处理的植株体最小氮含量与有氮素亏缺处理的植株体最大氮含量的平均值^[15],经计算本研究的冬小麦临界氮浓度常数为 4.32% ,依据临界氮稀释曲线公式,该氮浓度对应的 LDM 为 0.56 t/hm^2 ,则 N_c 计算式为

$$N_c = \begin{cases} 3.96R_{\text{LDM}}^{-0.14} & (R_{\text{LDM}} \geq 0.56) \\ 4.32\% & (R_{\text{LDM}} < 0.56) \end{cases} \quad (5)$$

2.1.3 叶片氮含量的变异性

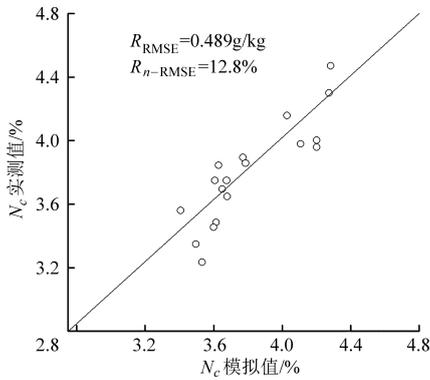
由于农民施氮策略的差异,冬小麦叶片氮含量存在很大的变异性,本研究以 2 年 3 次取样所测得的叶片氮浓度的最大、最小值(N_{\max} , N_{\min})来建立冬小麦氮素稀释边界模型,由于 2014 年冬小麦播种之前土壤基础氮含量较高,从而导致 2014 年 N_0 施氮量建立的 N_{\min} 曲线较 2013 年高,故取 2 年中的下限建立(图 2a)。从图 2 可以看出 2013 年较低,故选择 2013 年作为冬小麦的 N_{\min} 曲线($n = 9$); N_{\max} 由于 2 年差异不明显,因此,以 2 年冬小麦 N_3 处理施氮量的氮浓度和叶片干物质来建立($n = 18$)(图 2b),其边界氮含量的表达式为

$$\begin{cases} N_{\max} = 4.43R_{\text{LDM}}^{-0.3} & (R^2 = 0.80^{**}) \\ N_{\min} = 1.81R_{\text{LDM}}^{-0.61} & (R^2 = 0.84^{**}) \end{cases} \quad (6)$$

模型的拟合度,经计算 $R_{n-\text{RMSE}} = 12.8\%$,为较好水平,如图 3 所示。表明所建模型可以准确表征植株体氮素稀释过程,从而进一步用来评价冬小麦的氮营养状况。

2.3 营养生长期内氮营养指数的变化

冬小麦对氮肥的吸收主要在营养生长期,该时期氮营养状况直接决定最终的产量及其构成,本研

图 3 冬小麦 N_c 稀释曲线的校验Fig. 3 Calibration N_c dilution curve of winter wheat

究依据临界氮稀释曲线建立了氮营养指数的评价体系,从而量化了主要生育期冬小麦叶片的氮营养状况,经计算 2 年冬小麦 N_0 、 N_1 、 N_2 和 N_3 施氮量下的氮营养指数变化区间依次为: 0.57 ~ 0.81、0.79 ~ 0.94、0.97 ~ 1.08 和 1.07 ~ 1.21,依据其与数值“1”的大小关系来划分, N_0 和 N_1 氮营养处于亏缺状态, N_2 氮营养适中,而 N_3 氮营养过剩,从营养生长期冬小麦氮营养变化趋势来看,从大到小依次为:返青期、拔节期、花期,其变化趋势如图 4 所示。

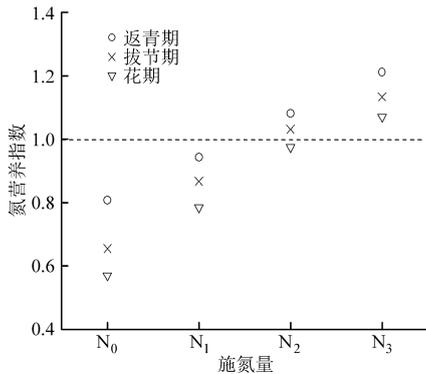


图 4 不同施氮量下冬小麦氮营养指数

Fig. 4 Nitrogen nutrition index changes at different nitrogen rates of winter wheat

2.4 氮营养指数与相对产量的关系

通过建立 2 年 3 个品种冬小麦氮营养指数 (R_{NNI}) 与相对产量 (R_{RY}) 的关系,可以找出相对产量最大时对应的植株体氮营养指数,如图 5 所示,当 R_{NNI} 为 1 时 R_{RY} 最大,而当 R_{NNI} 小于 1 时,由于氮营养的不足, R_{RY} 随 R_{NNI} 的增加而增加,当 R_{NNI} 大于 1 时, R_{RY} 随 R_{NNI} 的增加而减小,经拟合,关中地区冬小麦 R_{RY} 与 R_{NNI} 的表达式为: $R_{RY} = -2.8R_{NNI}^2 + 5.72R_{NNI} - 1.93$, $R^2 = 0.95^{**}$,但是考虑到 N_2 施氮量下对应的 R_{NNI} 略大于 1,故关中地区适宜的施氮量为应略小于 210 kg/hm^2 ,介于 $105 \sim 210 \text{ kg/hm}^2$ 之间,过量施氮和氮肥不足均会降低冬小麦的产量。

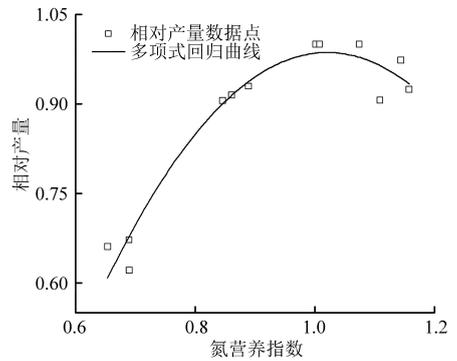


图 5 冬小麦氮营养指数与相对产量的关系

Fig. 5 Relation between nitrogen nutrition index and relative yield

3 讨论

本研究证明了基于叶片干物质氮临界稀释曲线的存在,其叶片氮含量随叶片干物质的增加呈降低趋势,其表达式可用一个负幂律函数表示。

3.1 冬小麦叶片氮含量的变异性

施氮量的高低使叶片氮含量存在很大的变异性,通过定义叶片的 2 个边界最大值 (N_{max}) 和最小值 (N_{min}) 稀释曲线来定义其变异性,最大值叶片氮含量是用来估计叶片贮氮能力的一个指标^[15],通常情况下可以通过不断地增加施氮量来获得,但是本研究仅设置了 4 个施氮量水平,所以其值可能未达到极限值; N_{min} 被定义的情形是氮素低至作物的新陈代谢将要停止时的氮含量^[15],本研究中以 N_0 处理作为建立 N_{min} 的数据来源,而事实上 N_0 处理由于未考虑到土壤本身氮残留^[29]、氮素干湿沉降^[30] 和土壤氮的矿化^[31] 等因素,所以 N_{min} 可能高于实测值;如式(6)所示,在 N_{max} 计算式中,参数 b 为 0.3,显著小于 N_{min} 中的参数 b ,其值为 0.61,这意味着 N_{max} 曲线氮稀释过程显著低于 N_{min} 曲线,主要原因为:在冬小麦需氮量较大的拔节期和花期, N_0 施氮量的供氮能力远低于 N_3 施氮量,从而导致 N_{max} 曲线稀释过程缓慢,而 N_{min} 曲线后期氮素亏缺明显,从而导致稀释过程加快。

3.2 本文模型与其他模型比较

本研究基于叶片干物质 (LDM) 建立了关中平原冬小麦临界氮稀释 (N_c) 曲线,与前人相比,参数 a 和 b 均较小于干物质 (DM) 建立的模型参数,如表 2 所示。

从数学的角度来讲,参数 a 代表当干物质为 1 t/hm^2 时的植株氮含量,表征作物生育初期内在的需氮特性^[22]。首先,本研究所得参数 a 小于在法国所建模型,原因主要有 2 个:①法国地处温带海洋性气候区,该地区冬季温暖夏年凉爽,而关中地区为大

陆性气候,冬冷夏热,这导致生育期较法国少约40 d左右,生育期长就意味着法国冬小麦氮素吸收量更多。②法国小麦籽粒氮含量^[32](2.2%~2.7%)高于关中地区^[33](2.01%~2.36%),这意味着其群体氮吸收量要高。其次,与文献[12]在华北平原和文献[16]在关中平原所建模型相比,本研究参数 a 同样偏低,这主要与建模所参照的组织器官有关,文献[12,16]均基于地上干物质(DM)建立了 N_c 曲线,其参数 a 定义为当DM为1 t/hm²时的氮浓度,而本研究中参数 a 定义为当叶片干物质(LDM)为1 t/hm²时的氮浓度,实际上当LDM为1 t/hm²时,对应的DM早已大于1 t/hm²,其氮素早已处于稀释阶段,这就导致基于LDM的参数 a 小于基于DM的模型。最后,参数 a 与文献[15]在南京市基于LDM建立的 N_c 曲线参数相比,本研究参数值偏高,这可能与气候因素有关,南京市处于亚热带季风气候区,总积温高于地处大陆性气候的关中平原,依据积温学原理^[34],这就造成南京地区冬小麦生育期^[35](200 d)短于关中平原^[36](250 d),生育期缩短必然导致吸氮量减少,从而造成参数 a 偏小。

表2 不同地区和器官之间冬小麦临界氮稀释曲线参数比较

Tab.2 Comparison of parameters of different regions and organs of winter wheat

地区	a /%	b	器官	文献序号
法国	5.35	0.44	地上干物质	[14]
中国南京市	3.05	0.15	叶片干物质	[15]
中国华北平原	4.15	0.38	地上干物质	[12]
中国关中平原	4.64	0.46	地上干物质	[16]
	3.96	0.14	叶片干物质	本研究

参数 b 表征植株氮含量随干物质的变化情况,其值取决于氮素吸收量与干物质之间的比例关系^[37]。叶片氮含量的降低主要归因于叶面积指数增加所导致的遮蔽现象发生,而通常情况下,上层叶片的氮含量要高于中下层^[38],随着遮蔽程度的增加,由于中下层叶片的增加最终导致了氮素稀释过程^[15]。参数 b 低意味着叶片氮稀释过程缓慢,本研究中基于LDM的参数与文献[12,14]基于DM的参数相比, b 明显偏低,但是与文献[15]的结论相似,2种算法的差异主要体现在,基于LDM的建模方法将叶片视为作物生长的中心问题,作物吸收的氮素

会尽可能的满足叶片生长、光合和呼吸,这就导致叶片氮含量下降缓慢^[39-40],而基于DM建立的 N_c 曲线,由于营养生长期茎秆氮含量小于叶片^[41],从而导致随着非光合性组织茎的快速增加地上部干物质的氮含量下降速率明显。

3.3 氮营养诊断与最佳施氮量的确定

当区域性特定作物临界氮稀释曲线建立后,通过计算实测叶氮含量与相同叶片干物质下的临界氮稀释曲线氮含量两者之间的比值,即可计算出不同生育期冬小麦在不同施氮量下的氮营养指数,依据其与数值1的大小关系来诊断物体的氮素盈亏状态,通过建立 R_{NNI} 和 R_{RY} 的关系,可以看出旱地冬小麦的最佳施氮量应为210 kg/hm²,但考虑到该施氮量下 R_{NNI} 略大于1,所以关中地区的最佳施氮量应略小于210 kg/hm²,处于同延安^[33]和赵俊晔等^[42]所得关中地区冬小麦最佳量(105~210 kg/hm²)之间。

3.4 基于叶片干物质诊断植株体氮营养的可行性

在实践操作中,只需要测定叶片的干质量和叶氮含量,将值代入 N_c 曲线就可判断出植株体的氮营养状况,相对于光谱遥感^[7]、测土施肥技术^[8]以及叶绿素测定^[9]等测定方法,本方法成本更低,此外,相对于基于地上干物质(DM)建模法,叶片干燥时间更短,测定样本更多。

4 结束语

冬小麦叶片氮含量随着叶片干物质的增加而降低,较之于地上部干物质建立的临界氮稀释曲线,参数 a 和 b 均较小,尤其是 b ;通过氮稀释曲线建立的氮营养指数(R_{NNI})可以看出,在 N_0 和 N_1 施氮量下, R_{NNI} 小于1,呈现氮营养亏缺,在 N_3 施氮量下, R_{NNI} 大于1,呈现氮营养过剩,而在 N_2 施氮量下, R_{NNI} 约等于1,表明氮营养状况适宜,通过建立相对产量(R_{RY})和氮营养指数(R_{NNI})的关系,表明最佳施氮量为210 kg/hm²,氮量不足或者过量施氮都会降低作物产量;本研究以2年、3个品种建立了陕西省关中平原冬小麦基于叶片干物质的临界氮稀释曲线,证明了其参数的稳定性,模型用来诊断关中地区冬小麦营养生长阶段的氮营养状况,指导科学施氮。

参 考 文 献

- 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.
Zhu Zhaoliang, Jin Jiyun. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013,19(2): 259-273. (in Chinese)
- 杨宪龙,路永莉,同延安,等. 陕西关中小麦-玉米轮作区协调作物产量和环境效应的农田适宜氮肥用量[J]. 生态学报, 2014,34(21): 6115-6123.

- Yang Xianlong, Lu Yongli, Tong Yan'an, et al. Optimum-N application rate to maximize yield and protect the environment in a wheat-maize rotation system on the Guanzhong Plain Shaanxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(21): 6115 – 6123. (in Chinese)
- 3 Shoji S, Delgado J, Mosier A, et al. Use of controlled release fertilizers and nitrification inhibitors to increase nitrogen use efficiency and to conserve air and water quality [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32(7–8): 1051 – 1070.
- 4 Guo J H, Liu X, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008 – 1010.
- 5 岳文俊, 张富仓, 李志军, 等. 水氮耦合对甜瓜氮素吸收与土壤硝态氮累积的影响 [J]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 88 – 96, 119.
- Yue Wenjun, Zhang Fucang, Li Zhijun, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen uptake of muskmelon and nitrate accumulation in soil [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2): 88 – 96, 119. (in Chinese)
- 6 Zhu Anning, Zhang Jiabao, Zhao Bingzi, et al. Water balance and nitrate leaching losses under intensive crop production with ochric aquic cambosols in north China plain [J]. *Environment International*, 2005, 31(6): 904 – 912.
- 7 Hansen P M, Schjoerring J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 542 – 553.
- 8 Ren Tao, Peter Christie, Wang Jingguo, et al. Root zone soil nitrogen management to maintain high tomato yields and minimum nitrogen losses to the environment [J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 125(1): 25 – 33.
- 9 Fox R H, Piekielek W P, Macneal K M, et al. Using a chlorophyll meter to pre-dict nitrogen fertilizer needs of winter wheat [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1994, 25(3–4): 171 – 181.
- 10 Ulrich A. Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1952, 3(1): 207 – 228.
- 11 Greenwood D J, Lemaire G, Gosse G, et al. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass [J]. *Annals of Botany*, 1990, 66(4): 425 – 436.
- 12 Yue Shanchao, Meng Qingfeng, Zhao Rongfang, et al. Critical nitrogen dilution curve for optimizing nitrogen management of winter wheat production in the north China plain [J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(2): 523 – 529.
- 13 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.
- Zhao Ben, Yao Xia, Tian Yongchao, et al. Accumulative nitrogen deficit models of wheat aboveground parts based critical nitrogen concentration [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(11): 3141 – 3148. (in Chinese)
- 14 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.
- 15 Yao Xia, Zhao Ben, Tian Yongchao, 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.
- 16 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, 273.
- Li Zhengpeng, Feng Hao, Song Mingdan. Critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition index research in Guanzhong Plain [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 177 – 183, 273. (in Chinese)
- 17 Ziadi N, Brassard M, Bélanger G, et al. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for corn in eastern Canada [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(2): 271 – 276.
- 18 Kage H, Alt C, Stutzel H, et al. Nitrogen concentration in cauliflower organs as determined by organ size, N supply, and radiation environment [J]. *Plant and Soil*, 2002, 246(2): 201 – 209.
- 19 赵护兵, 王朝辉, 高亚军. 关中平原农户冬小麦养分资源投入的调查与分析 [J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(6): 1135 – 1139.
- Zhao Hubing, Wang Zhaohui, Gao Yajun. Investigation and analysis of winter wheat nutrients recourse inputting in Guanzhong area [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(6): 1135 – 1139. (in Chinese)
- 20 Horowitz W. AOAC official methods of analysis [M]. 17th ed. Gaithersburg, M D: Association of Official Analytical Chemists International, 2000.
- 21 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.
- 22 Lemaire G, van Oosterom 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.
- 23 Gastal F, Lemaire G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(370): 789 – 799.
- 24 Willmott C J. Some comments on the evaluation of model performance [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1982, 63(11): 1309 – 1313.
- 25 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.

- 26 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.
- 27 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. Wang Xin, Ma Fuyu, Diao Ming, et al. Simulation of critical nitrogen concentration, nitrogen uptake and nitrogen nutrition index of processing tomato with drip irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(18): 99 – 108. (in Chinese)
- 28 Debaeke P, van Oosterom E J, Justes E, et al. A species-specific critical nitrogen dilution curve for sunflower (*Helianthus annuus* L.) [J]. *Field Crops Research*, 2012, 136: 76 – 84.
- 29 张丽娟, 巨晓棠, 张福锁, 等. 土壤剖面不同层次标记硝态氮的运移及其后效[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9):1964 – 1972. Zhang Lijuan, Ju Xiaotang, Zhang Fusuo, et al. Movement and residual effect of labeled nitrate-N in different soil layers[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9):1964 – 1972. (in Chinese)
- 30 Liu Xuejun, Zhang Ying, Han Wenxuan, et al. Enhanced nitrogen deposition over China [J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459 – 462.
- 31 Guntiñas M E, M C Leirós, Trasar-Cepeda C, et al. Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: a laboratory study[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 48:73 – 80.
- 32 Martre P, Porter J R, Jamieson P D, et al. Modeling grain nitrogen accumulation and protein composition to understand the sink/source regulations of nitrogen remobilization for wheat[J]. *Plant Physiology*, 2003, 133(4):1959 – 1967.
- 33 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. Tong Yan'an, Zhao Ying, Zhao Hubing, et al. Effect of N rates on N uptake, transformation and the yield of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(1): 64 – 69. (in Chinese)
- 34 白彩云, 李少昆, 柏军华, 等. 我国东北地区不同生态条件下玉米品种积温需求及利用特征[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(9): 2337 – 2342. Bai Caiyun, Li Shaokun, Bai Junhua, et al. Characteristics of accumulated temperature demand and its utilization of maize under different ecological conditions in Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9): 2337 – 2342. (in Chinese)
- 35 张彬. 冬小麦对昼夜不同增温的地下生物学响应特征及其机制[D]. 南京:南京农业大学, 2010. Zhang Bin. Belowground biological responses and their mechanisms of winter wheat to three diurnal warming scenarios [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- 36 郑彩霞, 张富仓, 张志亮, 等. 限量灌水和施磷对冬小麦养分吸收及利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(3): 102 – 107. Zheng Caixia, Zhang Fucang, Zhang Zhiliang, et al. Effect of limited irrigation and phosphorus fertilizer to nutrition absorption and utilization of winter wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(3): 102 – 107. (in Chinese)
- 37 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.
- 38 de Bruin J, Messina C D, Munaro E, et al. N distribution in maize plant as a marker for grain yield and limits on its remobilization after flowering[J]. *Plant Breeding*, 2013, 132(5):500 – 505.
- 39 Bannister P. Observation on water potential and drought-resistance of trees and shrubs after a period of summer drought around Dunedin, New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Botany*, 1986, 24(3): 387 – 392.
- 40 Wang Zhijie, Wang Jihua, Zhao Chunjiang, et al. Vertical distribution of nitrogen in different layers of leaf and stem and their relationship with grain quality of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, 28(1): 73 – 91.
- 41 党红凯, 李瑞奇, 李雁鸣, 等. 超高产冬小麦对氮素的吸收、积累和分配[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(5): 1037 – 1047. Dang Hongkai, Li Ruiqi, Li Yanming, et al. Absorption, accumulation and distribution of nitrogen in super-highly yielding winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(5): 1037 – 1047. (in Chinese)
- 42 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. Zhao Junye, Yu Zhenwen. Effects of nitrogen rate on nitrogen fertilizer use of winter wheat and content of soil nitrate-N under different fertility condition [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 815 – 822. (in Chinese)