

技术与方法 Techniques and Methods

小麦叶片临界氮浓度稀释曲线的建立与应用

马晓晶, 张小涛, 黄玉芳, 叶优良*

河南农业大资源与环境学院, 郑州450002

摘要: 利用临界氮浓度稀释模型开展小麦氮素营养诊断研究, 探讨以小麦叶片临界氮浓度作为氮素营养诊断的可行性, 为小麦氮肥管理提供理论依据和技术参考。本研究以大穗型品种‘周麦16’和多穗型品种‘豫麦49-198’为材料, 设置5个氮水平(纯氮0、120、180、240、360 kg·hm⁻²), 在5年定位试验基础上分别构建小麦叶片干物质临界氮浓度稀释曲线和氮营养指数模型。结果表明, 小麦叶片干物质和氮浓度之间呈负幂函数关系, 模型在年度之间具有较好的稳定性, 根据氮营养指数变化可准确判断小麦氮营养状况。‘周麦16’: $N_c=2.63LDM^{-0.26}$, NNI介于0.78~1.10, 模型年度间n-RMSE为16%; ‘豫麦49-198’: $N_c=2.56LDM^{-0.23}$, NNI介于0.70~1.13, 模型年度间n-RMSE为15%。验证实验发现, 基于叶片干物质建立的临界氮浓度稀释曲线能很好地诊断小麦氮营养状况, 即本研究所建立的模型能够直接用于调控小麦叶片氮素营养。

关键词: 小麦; 叶片; 临界氮浓度稀释曲线; 氮营养指数

减少环境消耗, 提高粮食产量, 已成为目前的研究热点(Chen等2014)。而氮肥投入成为全球食物供应量的主要限制因素。而过量施氮却造成了一系列环境问题, 如水体富营养化、温室气体排放加剧(Zhang等2013)等。就我国而言, 过量施肥的现象相当普遍(巨晓棠和谷保静2014)。因此, 如何合理精准施用氮肥是减少氮肥投入量、增加产量、提高氮肥利用率、减少污染和实现可持续发展的关键。

氮素营养诊断是精准施用氮肥的关键技术(郭建华等2008)。目前氮素营养诊断主要包括硝酸盐快速诊断、SPAD计快速诊断(蔡红光等2010)、光谱诊断(Grohs等2009)以及遥感技术等, 它们的共同缺点是当作物处于奢侈吸收时, 测定结果不稳定(Ghasemi等2011)。Greenwood等(1990)建立的用于C₃和C₄植物的临界氮浓度稀释曲线($N_c=aW^b$)克服了因植株体内氮浓度过高造成的测定误差。临界氮浓度稀释曲线是基于植株干物质和植株氮浓度所建立的, 旨在找出当作物地上部干物质达到最大生长速率时最低氮浓度; 目前该模型已被应用在土豆、番茄、油菜、水稻、小麦多种作物上。以小麦为例, 目前建立的临界氮模型多以小麦整株为研究对象, 但气候、环境甚至基因的不同都会造成曲线的变化, 尤其是当植株遭受逆境胁迫时, 干物质的分配会发生变化(Kage等2002), 从而影响曲线的建立, 故研究作物不同器官的临界氮浓度稀释曲线显得尤为重要。

氮累积量是影响小麦产量潜力至关重要的因

素(Ye等2011)。在小麦的生长过程中, 叶片是光合作用的重要器官, 叶片的干物质是衡量作物生长潜力、光能利用率和产量的重要指标(Zhao等2005)。叶片对环境氮素营养变化极为敏感, 一般小麦叶片干物质和叶片氮浓度随施氮量的增加而增加, 当施氮量达到一定水平后, 叶片干物质不再增加, 氮浓度继续增加; 而随小麦生育期的延伸, 叶片干物质累积量呈增加趋势, 叶片氮浓度呈下降趋势(刘小宁2014); 因此叶片氮素状况是评价植株生长状况和估测产量的重要指标。叶片氮浓度下降是因为在小麦生长过程中叶片不断生长, 叶片的数量和面积不断增加, 发生遮蔽现象, 下层叶片数量不断增加, 遮蔽程度加剧, 而上层叶片含量一般高于下层叶片(Debruin等2013), 导致了氮素的稀释过程(Yao等2014); 这为利用小麦叶片干物质建立临界氮浓度稀释曲线提供了理论基础。不同的小麦品种对氮素的利用率不同(李淑文等2006), 造成了叶片干物质和氮浓度的差异, 进而影响到临界氮浓度稀释曲线的建立, 以往研究用不同的小麦品种建立统一的临界氮浓度稀释曲线。与此同时, 当小麦返青时, 由于地域不同, 各地区叶片干物质累积量不同, 但已有研究将返青时叶片临界氮浓度均设为定值。华北平原属于温带大陆性气候, 光资源丰富, 而全球变暖的趋势使华北平原

收稿 2016-12-14 修定 2017-05-08

资助 国家自然科学基金(31471935)。

* 通讯作者(E-mail: ylye2004@163.com)。

热资源更加丰富, 全区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$, 积温呈整体增加趋势(马洁华等2010)。返青时, 小麦叶片干物质累积量较高(刘小宁2014), 临界氮浓度已不能再用定值表示(Ata-Ul-Karim等2013)。鉴于上述情况, 本研究在5年定位试验的基础上, 以大穗型品种‘周麦16’和多穗型品种‘豫麦49-198’为例, 利用植株临界氮浓度稀释曲线模型预测不同基因型小麦的叶片临界氮浓度, 探讨小麦叶片临界氮浓度稀释曲线模型的适用性和以叶片氮营养指数评价冬小麦氮营养状况的可行性。

材料与方法

1 试验地概况

试验从2011年在河南省禹州市顺店镇康城村(北纬 $34^{\circ}27'$, 东经 $113^{\circ}34'$)进行, 为小麦-玉米轮作定位试验。该地区属于暖温带半湿润季风气候, 土壤类型为潮土, 粘壤。试验开始前0~30 cm土层土壤有机质含量 $20.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.04\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, N_{\min} $58\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 有效磷 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $142\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 8.2, 容重 $1.45\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。种植模式为小麦-玉米轮作。

2 试验设计

试验小麦(*Triticum aestivum* L.)品种为‘周麦16’与‘豫麦49-198’, 设0、120、180、240和360 $\text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$ 5个氮水平, 用N0、N120、N180、N240和N360表示。氮肥为尿素(46%纯N), 1/2播前施入, 1/2拔节期追施; 磷肥为过磷酸钙(含12% P_2O_5), 钾肥为氯化钾(含60% K_2O), 用量均为 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 作为基肥一次性施入。小区面积 48 m^2 , 重复3次, 共计30个小区。小麦同年10月17日播种, 次年6月5日收获。种植密度为 $165\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。玉米6月播种, 同年9月收获, 试验处理与小麦相同

3 植株样品的采集与养分测定

于2014~2015年和2015~2016年在小麦播后65、120、135、150和165 d随机选取20株样品, 取其叶片 105°C 杀青, 80°C 烘干, 称重; 粉碎后过1 mm筛, 经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮, 用AA3型连续流动分析仪测定叶片氮浓度。

4 模型描述

4.1 曲线构建和验证

根据Justes等(1994)提出的临界氮浓度(N_c)的理论, 构建模型步骤: (1)每次取样后测定其干物质及其相应的氮浓度。通过方差分析将作物为非两

类: 受氮素营养限制、不受氮素营养限制; (2)对于受氮素营养限制的数据, 其地上部干物质与相应的氮浓度进行线性拟合; (3)对于不受限部分, 取其干物质最大值; (4)取样日期的理论临界氮浓度为上两步中的线性曲线交点的纵坐标。基于叶片干物质的临界氮效应稀释曲线模型为:

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

式中, N_c : 作物临界氮浓度(%); LDM: 叶片干物质累积量($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$); a: 叶片干物质为1 t时的临界氮浓度(%)(Lemaire等2007); b: 临界氮浓度稀释曲线斜率(Gastal和Lemaire 2002)。

模型的验证采用国际通用的回归估计标准误差RMSE (Willmott 1982)和n-RMSE (Yang等2000)以及通过模拟值与实测值之间1:1直方图来检测模型的拟合度和可靠性。RMSE和n-RMSE的计算公式分别为:

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

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

式中, s_i 、 m_i : 模拟值、实测值; n : 数据格式; S : 实测数据的平均值。

RMSE值越小, 模拟值与真实值的一致性越好, 偏差越小, 即模型的精度越高。n-RMSE无单位限制, 能用来比较不同单位数据的模型稳定性。一般认为, n-RMSE $<10\%$, 模型稳定性极好; $10\% < \text{n-RMSE} < 20\%$, 模型稳定性较好; $20\% < \text{n-RMSE} < 30\%$, 模型稳定性一般; n-RMSE $>30\%$, 模型稳定性较差(Jamieson等1991)。

4.2 模型的建立与校验

以2015~2016年2个品种(‘周麦16’和‘豫麦49-198’)冬小麦采样(播后65、120、135、150和165 d)的临界氮浓度及其对应最大叶片干物质数据点来构建模型。模型校验采用独立的数据点。选取2014~2015年2个小麦品种(‘周麦16’和‘豫麦49-198’)5次采样(播后65、120、135、150和165 d)的实测值和模拟值数据来校验模型。

4.3 氮营养指数

为了更精确地反映小麦叶片氮素营养状况, 采用氮营养指数(NNI), 其表达式为:

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

式中, N_a : 小麦叶片氮浓度实测值(%). NNI反映作物体内氮素营养状况, $NNI=1$, 氮营养适宜; $NNI>1$, 氮营养过剩; $NNI<1$, 氮营养亏缺。

4.4 相对产量

相对产量为冬小麦收获时不同施氮水平下实收产量与最大产量的比值(Oosterom和Justes 2012)。

5 数据处理

试验数据采用Microsoft Excel 2013、SPSS 21.0和Origin 8.1进行数据计算、绘图与统计分析, 处理间差异显著性检验采用Duncan法, 显著性水平设定为 $P=0.05$ 。

实验结果

1 不同施氮水平对小麦叶片干物质累积量和氮浓度的影响

由图1可见, 小麦叶片干物质累积量随生育期

的延伸呈增加的趋势, 在播后65 d (越冬)时最低, 在播后165 d (拔节)升至最高, 变幅在 $0.63\sim 3.4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间; 从播后120 d, 不同处理叶片干物质差异明显增大。随氮肥用量的增加, 叶片干物质呈增加趋势, 施氮处理显著高于不施氮处理, 施氮量超过 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 没有显著差异。2个品种相比, ‘周麦16’在播后135 d (返青)施氮处理间差异最大, N240与N360之间差异不显著, 但都显著大于N120、N180处理; 在播后150和165 d各施氮处理差异较小。‘豫麦49-198’在播后135 d后, 各施氮处理间差异较大, N240与N360差异不显著。2个品种小麦叶片干物质满足下列统计意义上的不等式。

‘周麦16’: $LDM_0 < LDM_{120} < LDM_{180} < LDM_{240} = LDM_{360}$

‘豫麦49-198’: $LDM_0 < LDM_{120} < LDM_{180} < LDM_{240} = LDM_{360}$

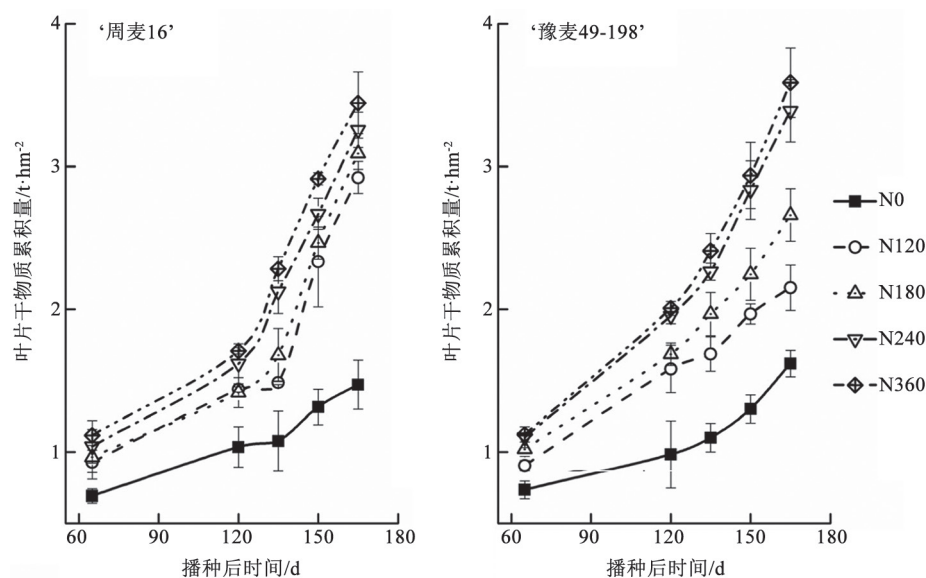


图1 施氮量对小麦叶片干物质累积量的影响
Fig.1 Effect of nitrogen rate on leaf dry matter in wheat

由图2可见, 随小麦生育时期的延伸, 叶片氮浓度呈下降趋势。叶片氮浓度从播后65 d (越冬)逐渐降低, 在播后165 d (拔节期)达到最低; 从播后120 d, 不同处理叶片氮浓度差异明显增大。随氮肥施用量的增加, 叶片氮浓度呈增加趋势, 施氮处理显著高于不施氮处理。2个品种中, ‘周麦16’的N180与N240、N360之间差异较小, ‘豫麦49-198’的N180与N240、N360之间差异较大。

2 小麦叶片干物质临界氮浓度稀释曲线的建立

由图3可见随小麦叶片干物质的增长, 临界氮浓度呈逐渐下降趋势, 两品种的模型均为负幂函数, 但模型参数差异明显, 因此对两品种分别进行临界氮浓度稀释曲线的拟合, ‘周麦16’方程为: $N_c = 2.63LDM^{-0.27}$, $R^2 = 0.8156$; ‘豫麦49-198’方程为: $N_c = 2.54LDM^{-0.24}$, $R^2 = 0.8168$, 均达到极显著水平。

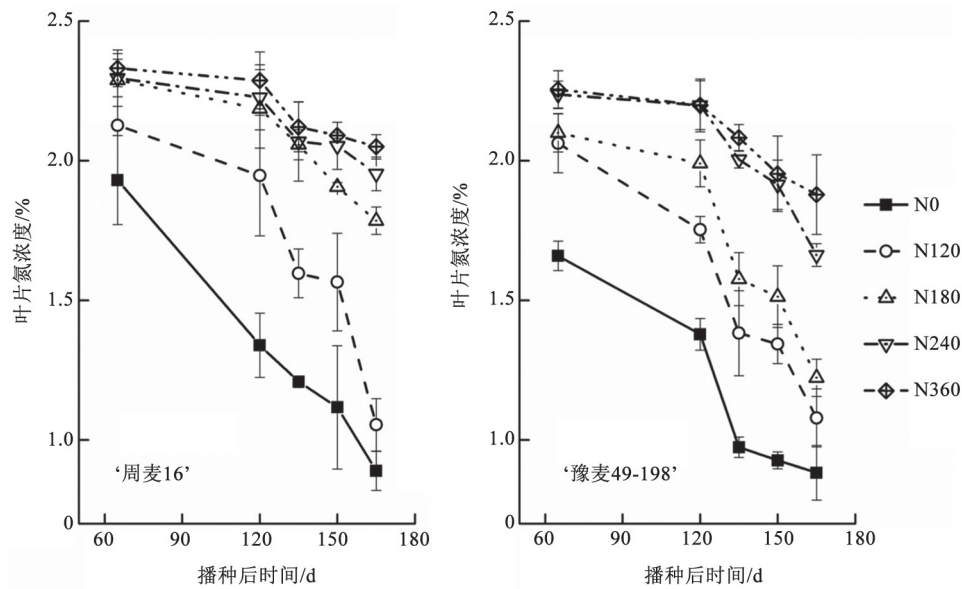


图2 施氮量对小麦叶片氮浓度的影响

Fig.2 Effect of nitrogen rate on leaf N concentration in wheat

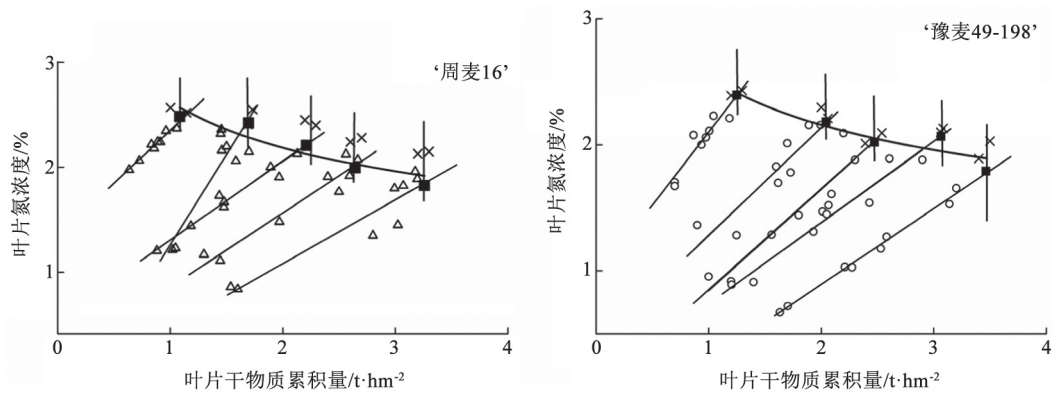


图3 小麦叶片干物质临界氮浓度稀释曲线

Fig.3 Critical nitrogen concentration dilution in leaf dry matter of wheat

△(‘周麦16’)、○(‘豫麦49-198’): 小麦生长过程受氮素限制的点; ×: 不受氮素限制的点; ■: 每个时期的临界氮浓度值; 曲线: 小麦叶片临界氮浓度稀释效应曲线。

3 临界氮浓度稀释曲线模型的验证

对上述模型进行验证表明(图4), 两品种小麦Nc模拟值与实测值之间关系可用1:1直方图直观显示。根据公式(2)和(3)分别求的‘周麦16’的RMSE=0.29, n-RMSE=16%; ‘豫麦49-198’的RMSE=0.29, n-RMSE=15%, 可以看出模型稳定度较高, 表明小麦叶片临界氮浓度稀释曲线模型可用于小麦叶片氮素营养诊断。

4 不同施氮水平对小麦叶片氮营养指数(NNI)的影响

依据氮营养指数(NNI)的评价体系, 量化了叶

片的氮营养状况(图5)。将NNI依据其与数值“1”的大小关系来划分。对‘周麦16’来说, 当施氮量低于 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, $\text{NNI} < 1$, 处于氮营养亏缺状态; 施氮量为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{NNI} = 1$, 氮营养适中; 施氮量超过 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{NNI} > 1$, 氮营养过剩。对于‘豫麦49-198’, 当NNI当施氮量低于 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 均小于1, 氮营养缺乏; 施氮量为 $360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, $\text{NNI} > 1$, 氮营养盈余。

5 相对产量与氮营养指数的关系

用氮营养指数与相对产量拟合的结果发现(图6), 对于‘周麦16’, $\text{NNI} = 1$ 时, 相对产量随着NNI

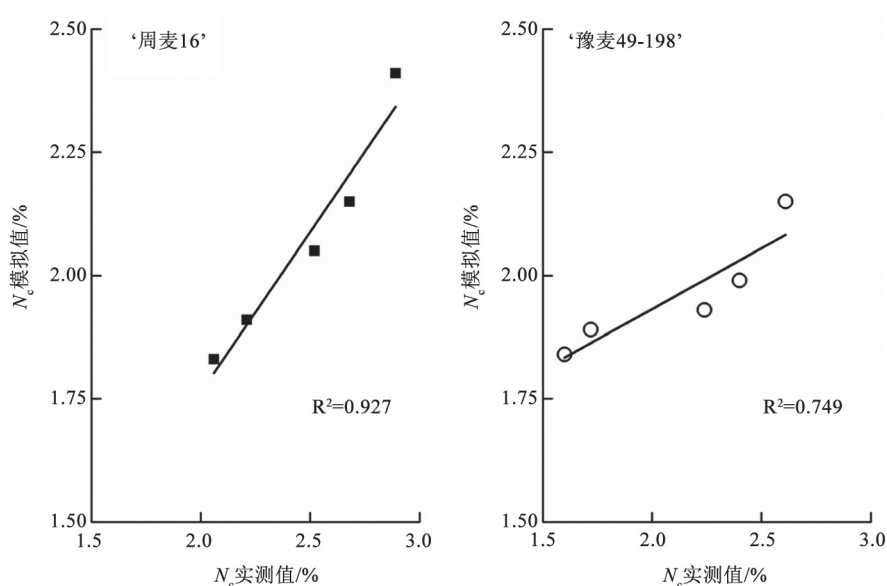


图4 小麦叶片临界氮浓度稀释曲线的校验

Fig.4 Calibration N_c dilution curve of leaf dry matter of wheat

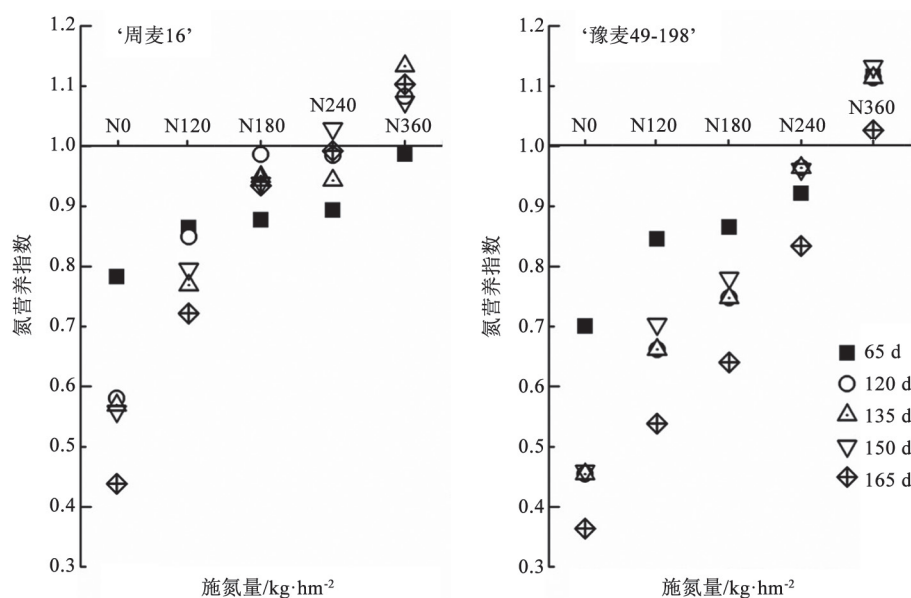


图5 施氮量对小麦氮营养指数的影响

Fig.5 Effect of nitrogen application rate on N nutrition index of wheat

的增大而降低。‘豫麦49-198’趋势与‘周麦16’基本相同, 相对产量达到最大, $NNI < 1$ 时, 相对产量随着 NNI 的增大而增大; 当 $NNI > 1$ 时, 相对产量随着 NNI 的变化先增加后降低。值得注意的是, 在本试验条件下当相对产量达到最大时, ‘豫麦49-198’ $NNI < 1$ 。

讨 论

临界氮浓度稀释曲线模型已经成为国外作物氮素营养诊断的一种重要的方法, 用于诊断作物氮素缺乏, 确定作物需氮量, 为作物生长发育、产量构成和品质形成提供依据, 并且能够与叶绿计

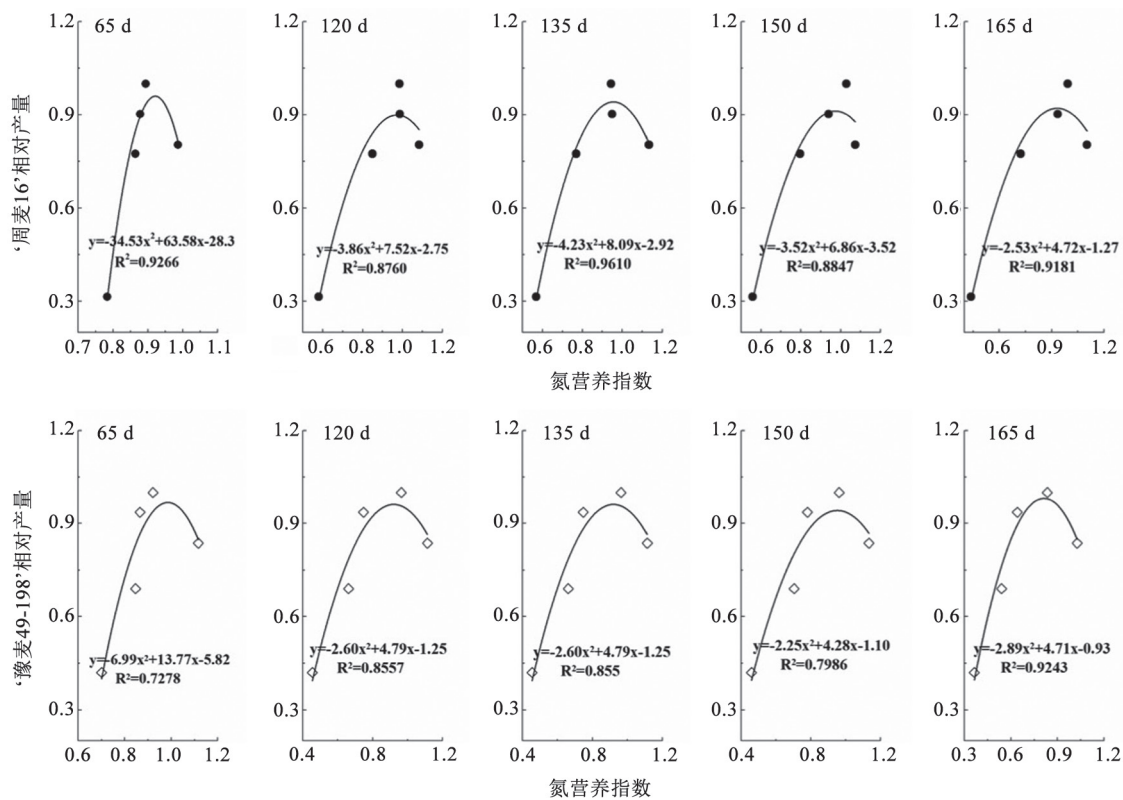


图6 氮营养指数与小麦相对产量的关系

Fig.6 Relation between nitrogen nutrition index and relative yield of wheat

读数(SPAD值)结合,快速、无损、准确地对植株进行营养诊断,克服了因叶色所造成的SPAD值差异,相较于目前的遥感监测技术更简便和易普及(Wood等2003)。植株叶片对环境中氮营养变化极为敏感,相对于整个植株可以更早的反映出植株氮素营养状况。

根据已有研究结果,基于小麦叶片干物质建立的临界氮浓度曲线模型有南京地区(Yao等2014) ($N_c = 3.06LDM^{-0.15}$)和关中平原(强生才等2015) ($N_c = 3.96LDM^{-0.14}$)。较之于本研究所建立模型参数差异较大,本研究参数a偏低,参数b较大。参数a表示干物质为1 t·hm⁻²时植株的氮浓度,参数b由植株氮营养与植株干物质之间的比值决定。在传统的研究方法中,临界氮浓度由地上部干物质决定,但本文认为临界氮浓度与植株的生育时期有关,与赵之淦研究结果相同(赵之淦2014)。在小麦生长初期,植株间对营养和光照的竞争现象不明显,因此目前已有的研究多集中于小麦营养生长的返青至孕穗或开花阶段(Yao等2014; 强生才等2015)。本研究地点为华北平原,属温带大陆性气候,在小

麦返青期以前积温低,小麦生长基本停滞,叶片干物质质量缓慢上升,叶面积指数低,遮蔽程度低,氮素营养由下部叶片向顶部叶片转移量少,氮素稀释程度低(石祖梁等2009),造成参数a值偏低。小麦越冬期至拔节期主要进行营养生长,此时植株中的氮素主要供给新叶的生长,叶片中氮浓度显著高于整株氮浓度以及其他各器官氮浓度,孕穗期后氮素供应改变,叶片中的氮素开始向籽粒中转移,叶片中氮浓度降低。本研究所选取建立方程的时期早于已有研究,叶片氮浓度与干物质的比值偏大,造成b值偏大。以上原因造成了本研究模型参数与已有模型参数的差异。

岳松华等(2016)用不同穗型小麦整株干物质建立了豫中地区冬小麦临界氮浓度稀释曲线模型,方程中参数a ($a_{YM} = 4.03$, $a_{ZM} = 3.756$, $b_{YM} = 0.435$, $b_{ZM} = 0.388$)均大于本文研究结果。因为小麦地上部干物质质量上升速度大于叶片干物质,当叶片干物质达到1 t时,小麦地上部干物质远远超过1 t,已经进入氮营养稀释阶段(强生才等2015),因而本研究模型参数a值偏低。在小麦营养生长后期,茎的干物

质量迅速增加(党红凯等2013), 在生殖生长阶段, 干物质分配发生变化, 氮素营养转运发生变化, 穗快速增长, 地上部氮浓度降低, 氮稀释现象加剧, 因而利用小麦整株建立的模型其斜率大于以小麦叶片所建模型斜率, 所以本模型中参数b偏小。

不同基因型小麦对氮肥敏感性不同。本课题组多年试验结果表明, 大穗型‘周麦16’为氮低效品种, 多穗型‘豫麦49-198’为氮高效品种(刘小宁2014), 即不同基因型小麦氮素利用效率存在差异。根据各时期NNI与“1”的关系, ‘周麦16’最佳施氮量为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, ‘豫麦49-198’的最佳施氮量应略大于 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 这与本课题组以前豫中地区最佳施氮量为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 研究结果不一致, 有待于进一步深入研究。

本文根据临界氮浓度所建立的氮营养指数模型估测豫中地区最佳施肥量为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较之前最佳施肥量有所上升, 主要是因为长期定位连续施氮条件下, 土壤供氮能力发生了变化, 氮肥增产作用下降(聂胜委等2012), 这与陕西省长武县20年长期定位试验的研究结果相同(Hao等2007)。我们从6年的田间试验观察也发现, 前3年无氮区和低氮区产量比较稳定, 第4年后产量开始下降, 但高氮区的产量相对稳定。因此, 综合本课题组6年定位试验结果表明, 豫中地区适宜施肥量为 $180 \sim 240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

本文通过对不同施氮水平下小麦的叶片干物质、氮浓度的动态变化分析, 表明小麦叶片干物质的增长、氮浓度的变化受施氮量和基因型的影响, 施氮量为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下可以获得较高的干物质累积量。利用不同基因型小麦叶片干物质建立了临界氮浓度稀释曲线模型, 表明叶片干物质与叶片氮浓度之间的关系, 模型具有良好的稳定性, 可以作为评价小麦氮营养状况的指标, 为小麦生产中精确氮肥管理提供理论途径和技术指导。

参考文献

- Ata-Ul-Karim ST, Xia Y, Liu X, Cao W, Yan Z (2013). Development of critical nitrogen dilution curve of Japonica rice in Yangtze River Reaches. *Field Crop Res*, 149 (149): 149–158
- Cai HG, Mi GH, Chen FJ, Zhang XZ, Gao Q (2010). Genotypic variation of leaf SPAD value, nitrogen and nitrate content in maize. *Plant Nutr Fert Sci*, 16 (4): 866–873(in Chinese with English abstract) [蔡红光, 米国华, 陈范骏, 张秀芝, 高强(2010). 玉米
- 叶片SPAD值、全氮及硝态氮含量的品种间变异. *植物营养与肥料学报*, 16 (4): 866–873]
- Chen X, Cui Z, Fan M, Vitousek P, Zhao M, Ma W, Wang Z, Zhang W, Yan X, Yang J (2014). Producing more grain with lower environmental costs. *Nature*, 514 (7523): 486–489
- Dang HK, Li RQ, Li YM, Sun YH, Zhang XW, Liu MX (2013). Absorption, accumulation and distribution of nitrogen in super-highly yielding winter wheat. *Plant Nutr Fert Sci*, 19 (5): 1037–1047 (in Chinese with English abstract)[党红凯, 李瑞奇, 李雁鸣, 孙亚辉, 张馨文, 刘梦星(2013). 超高产冬小麦对氮素的吸收、积累和分配. *植物营养与肥料学报*, 19 (5): 1037–1047]
- Debruin J, Messina CD, Munaro E, Thompson K, Conlon-Beckner C, Fallis L, Sevenich DM, Gupta R, Dhugga KS (2013). N distribution in maize plant as a marker for grain yield and limits on its remobilization after flowering. *Plant Breeding*, 132 (5): 500–505
- Gastal F, Lemaire G (2002). N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *J Exp Bot*, 53 (370): 789–799
- Ghasemi N, Sahebi MR, Mohammadzadeh A (2011). A review on biomass estimation methods using synthetic aperture radar data. *Int J Geomatics Geosci*, 1 (4): 776–788
- Greenwood DJ, Lemaire G, Gosse G, Cruz P, Draycott A, Neeteson JJ (1990). Decline in percentage N of C_3 and C_4 crops with increasing plant mass. *Ann Bot-London*, 66 (4): 425–436
- Grohs DS, Bredemeier C, Mundstock CM, Poletto N (2009). Model for yield potential estimation in wheat and barley using the GreenSeeker sensor. *Eng Arg-Jaboticabal*, 29 (1): 101–112
- Guo JH, Zhao CJ, Wang X, Chen LP (2008). Research advancement and status on cop nitrogen nutrition diagnosis. *China Soils Fert*, (4): 10–14 (in Chinese with English abstract) [郭建华, 赵春江, 王秀, 陈立平(2008). 作物氮素营养诊断方法的研究现状及进展. *中国土壤与肥料*, (4): 10–14]
- Hao MD, Fan J, Wang QJ, Dang TH, Guo SL, Wang JJ (2007). Wheat grain yield and yield stability in a long-term fertilization experiment on the loess plateau. *Pedosphere*, 17 (2): 257–264
- Jamieson PD, Porter JR, Wilson DR (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crop Res*, 27 (4): 337–350
- Ju XT, Gu BJ (2014). Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China. *Plant Nutr Fert Sci*, (4): 783–795 (in Chinese with English abstract) [巨晓棠, 谷保静(2014). 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势. *植物营养与肥料学报*, (4): 783–795]
- Justes E, Mary B, Meynard JM, Machet JM, Thelier-Huche L (1994). Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Ann Bot*, 74: 397–407
- Kage H, Alt C, Stützel H (2002). Nitrogen concentration of cauliflower organs as determined by organ size, N supply, and radiation environment. *Plant Soil*, 246 (2): 201–209
- Lemaire G, Oosterom EV, Sheehy J, Massignam A, Rossato L (2007). Is crop N demand more closely related to dry matter accumulation or leaf area expansion during vegetative growth. *Field Crop*

- Res, 100 (1): 91–106
- Li SW, Wen HD, Zhou YZ, Li YM, Xiao K (2006). Characterization of nitrogen uptake and dry matter production in wheat varieties with different N efficiency. *Sci Agric Sin*, (10): 1992–2000 (in Chinese with English abstract) [李淑文, 文宏达, 周彦珍, 李雁鸣, 肖凯(2006). 不同氮效率小麦品种氮素吸收和物质生产特性. *中国农业科学*, (10): 1992–2000]
- Liu XN (2014). Effects of nitrogen application on carbon and nitrogen content, populations and wheat scab [PhD Thesis]. Zhengzhou: Henan Agricultural University (in Chinese with English abstract) [刘小宁(2014). 施氮对小麦碳氮含量、群体变化和赤霉病的影响(博士论文). 郑州: 河南农业大学]
- Ma JH, Liu Y, Yang XG, Wang WF, Xue CY, Zhang XY (2010). Characteristics of climate resources under global climate change in the north China plain. *Acta Ecol Sin*, 30 (14): 3818–3827 (in Chinese with English abstract) [马洁华, 刘园, 杨晓光, 王文峰, 薛昌颖, 张晓煜(2010). 全球气候变化背景下华北平原气候资源变化趋势. *生态学报*, 30 (14): 3818–3827]
- Nie SW, Huang SM, Zhang SQ, Guo DD, Zhang QP, Zhang YT, Bao DJ, Chen YQ (2012). Advances in research on effects of long-term located fertilization on crops. *Chin J Soil Sci*, (04): 979–987 (in Chinese with English abstract) [聂胜委, 黄绍敏, 张水清, 郭斗斗, 张巧萍, 张玉亭, 宝德俊, 陈源泉(2012). 长期定位施肥对作物效应的研究进展. *土壤通报*, (04): 979–987]
- Oosterom EV, Justes E (2012). A species-specific critical nitrogen dilution curve for sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Field Crop Res*, 136 (5): 76–84
- Qiang SC, Zhang FC, Tian JK, Wu Y, Yan SC, Fan JL (2015). Development of critical nitrogen dilution curve in winter wheat based on leaf dry matter. *T Chin Soc Agric Mach*, (11): 121–128 (in Chinese with English abstract) [强生才, 张富仓, 田建柯, 吴悠, 闫世程, 范军亮(2015). 基于叶片干物质的冬小麦临界氮稀释曲线模拟研究. *农业机械学报*, (11): 121–128]
- Shi ZL, Yin M, Jing Q, Jiang D, Cao WX, Dai TB (2009). Vertical distribution of canopy nitrogen and its relationship with grain protein in winter wheat. *J Triticeae Crops*, 29 (2): 289–293 (in Chinese with English abstract) [石祖梁, 殷美, 荆奇, 姜东, 曹卫星, 戴廷波(2009). 冬小麦冠层氮素垂直分布特征及其与籽粒蛋白质的关系. *麦类作物学报*, 29 (2): 289–293]
- Willmott CJ (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *B Am Meteorol Soc*, 63 (11): 1309–1369
- Wood GA, Welsh JP, Godwin RJ, Taylor JC, Earl R, Knight SM (2003). Real-time measures of canopy size as a basis for spatially varying nitrogen applications to winter wheat sown at different seed rates. *Biosyst Eng*, 84 (4): 513–531
- Yang J, Greenwood DJ, Rowell DL, Wadsworth GA, Burns IG (2000). Statistical methods for evaluating a crop nitrogen simulation model. *Agr Syst*, 64 (1): 37–53
- Yao X, Zhao B, Tian YC, Liu XJ, Ni J, Cao WX, Zhu Y (2014). Using leaf dry matter to quantify the critical nitrogen dilution curve for winter wheat cultivated in eastern China. *Field Crop Res*, 159 (159): 33–42
- Ye Y, Wang G, Huang Y, Zhu Y, Meng Q, Chen X, Zhang F, Cui Z (2011). Understanding physiological processes associated with yield–trait relationships in modern wheat varieties. *Energ Fuel*, 124 (3): 316–322
- Yue SH, Liu CY, Huang YF, Ye YL (2016). Simulating critical nitrogen dilution curve and modeling nitrogen nutrition index in winter wheat in central Henan area. *Acta Agron Sin*, (06): 909–916 (in Chinese with English abstract) [岳松华, 刘春雨, 黄玉芳, 叶优良(2016). 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*, (06): 909–916]
- Zhang WF, Dou ZX, He P, Ju XT, Powlson D, Chadwick D, Norse D, Lu YL, Zhang Y, Wu L (2013). New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110 (21): 8375–8380
- Zhao D, Reddy KR, Kakani VG, Reddy VR (2005). Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum. *Eur J Agron*, 22 (4): 391–403
- Zhao ZJ (2014). Modelling the critical nitrogen concentration, root distribution of winter wheat and its eco-efficiency in North China Plain [PhD Thesis]. Beijing: China Agricultural University (in Chinese with English abstract) [赵之淦(2014). 华北冬小麦植株临界氮浓度、根系分布及生态效率的模拟分析(博士论文). 北京: 中国农业大学]

Establishment and application of critical nitrogen dilution curve for wheat based on leaf dry matter

MA Xiao-Jing, ZHANG Xiao-Tao, HUANG Yu-Fang, YE You-Liang*

College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

Abstract: In order to discuss the feasibility of using wheat leaf critical nitrogen concentration as nitrogen nutrition diagnosis index. A 5 years positioning experiment with Large spike type wheat of ‘Zhoumai 16’ and multiple spike type wheat of ‘Yumai 49-198’, 5 nitrogen levels (0, 120, 180, 240, 360 kg·hm⁻²) was conducted. The model of critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition index of wheat leaves dry matter were constructed respectively. ‘Zhoumai 16’: $N_c=2.63LDM^{-0.26}$, NNI between 0.78–1.10, n-RMSE of the model among these years was 16%; ‘Yumai 49-198’: $N_c=2.56LDM^{-0.23}$, NNI was between 0.70–1.13, n-RMSE of the model among these years was 15%. the relationship between dry matter and nitrogen concentration of wheat leaves was negative power function, and the model had good stability among these years. The critical nitrogen concentration dilution curve based on the leaf dry matter could diagnose nitrogen nutrition in wheat well. The model established in this study could be used to directly regulate and control the nitrogen nutrition of wheat leaves.

Key words: wheat; leaf; critical nitrogen dilution curve; nitrogen nutrition index

Received 2016-12-14 Accepted 2017-05-08

This work was supported by the National Science Foundation of China (Grant No. 31471935).

*Corresponding author (E-mail: ylye2004@163.com).