

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.023

关中平原冬小麦临界氮稀释曲线和氮营养指数研究*

李正鹏¹ 冯浩^{2,3} 宋明丹^{1,3}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 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: 在整理分析关中平原 7 年氮肥大田试验的基础上, 分析比较了不同氮肥处理下冬小麦的氮浓度稀释曲线, 并构建了关中平原主栽品种小偃 22 地上部生物量的临界氮浓度稀释曲线模型。结果表明: 不施氮、氮肥不足、氮肥适宜和过量施氮 4 组处理的平均产量分别为 4 263、5 097、6 023、6 203 kg/hm², 氮肥不足处理显著降低了小麦产量, 过量施氮与氮肥适宜处理相比产量没有显著差异。植株氮浓度均随生物量增加而降低, 较高的施氮量导致较高的植株氮浓度。关中平原冬小麦临界氮浓度与地上部最大生物量符合幂函数关系。利用氮营养指数 NNI(植株实际测定的氮浓度与临界氮浓度的比值) 和 2010—2011 年冬小麦季的独立试验资料对建立的临界氮稀释曲线进行检验, 结果表明: 不施氮、氮肥不足、氮肥适宜和过量施氮 4 组处理的 NNI 值分别为 0.70、0.89、1.01 和 1.25; 关中平原各试验地土壤肥力差异较大, 冬小麦适宜施氮量为 75~180 kg/hm², 平均为 137 kg/hm²。该研究建立的临界氮稀释模型的准确性较高, 所得出的分析结果可靠, 可以用于诊断和调控冬小麦氮素营养。

关键词: 冬小麦 临界氮浓度 氮营养诊断 关中平原 优化施氮

中图分类号: S365; S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0177-07

Critical Nitrogen Dilution Curve and Nitrogen Nutrition Index
of Winter Wheat in Guanzhong Plain

Li Zhengpeng¹ Feng Hao^{2,3} Song Mingdan^{1,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, 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 in plant was defined as the minimum nitrogen concentration required for maximum plant above-ground biomass. By collecting and analyzing seven-site-year field experiments with various nitrogen application rates according to certain criteria, the critical nitrogen concentration dilution curve was constructed for the main winter wheat variety “Xiaoyan 22” in Guanzhong Plain. The relationship between maximum above-ground biomass and critical nitrogen concentration of winter wheat could be described by a negative power function. The nitrogen dilution curves affected by different nitrogen treatments were evaluated and compared. Results showed that increased nitrogen supply generally resulted in a greater nitrogen concentration. The winter wheat yield with zero, deficient, suitable and excess nitrogen were 4 263, 5 097, 6 023 and 6 203 kg/hm², respectively. Nitrogen deficiency would reduce wheat yield, however, there was no significant difference between the yield of excessive and suitable nitrogen application treatments. The dilution curve was validated with independent experiment data (2010—2011) through nitrogen nutrition index (NNI), which was defined as the ratio of measured to critical nitrogen concentrations. The results showed that the

收稿日期: 2015-01-09 修回日期: 2015-03-07

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA102904)和高等学校学科创新引智计划(111 计划)资助项目(B12007)

作者简介: 李正鹏, 博士生, 主要从事农业生态系统模拟研究, E-mail: lipengzheng131@163.com

通讯作者: 冯浩, 教授, 博士生导师, 主要从事水土资源高效利用研究, E-mail: nercwsi@vip.sina.com

NNI value with zero, deficit, suitable and excess nitrogen application treatments were 0.70, 0.89, 1.01 and 1.25, respectively. Wheat would get nutrition imbalance when nitrogen was used only as a base fertilizer and even reduce crop yield with excess nitrogen application. The suitable nitrogen application rate was 75 ~ 180 kg/hm² (averagely 137 kg/hm²) for winter wheat in Guanzhong Plain due to the variety of soil productivity. The critical nitrogen dilution curve could be used as a diagnostic tool to detect wheat nitrogen nutrition, and it also provides a key technical approach for guiding nitrogen fertilization practices and management in wheat production in Guanzhong Plain.

Key words: Winter wheat Critical nitrogen concentration Nitrogen nutrition diagnosis Guanzhong Plain Nitrogen optimization

引言

氮素是作物生长和增产的必需元素。了解作物氮素需求和不同生育期的氮营养状况是合理施氮肥的前提。氮营养诊断方法包括两大类^[1]:土壤氮素诊断和作物氮素诊断。作物体内养分状况是土壤养分供应、作物对养分需求和作物对养分吸收能力的综合反映^[2]。因此,通过对作物体内养分状况进行诊断是最准确的营养诊断方法之一。

1952 年 Ulrich^[3] 研究发现作物体内的氮浓度随着生物量的增长而下降,其表征方程被称为“氮浓度稀释曲线”,可以用幂函数表示。1990 年 Greenwood 等^[4] 提出了 C3 和 C4 作物的临界氮浓度和地上部生物量关系的通用模型,同年, Lemaire 等^[5] 在大量试验基础上,修正了其中的参数,提出了 2 个新模型,但由于供试作物种类的限制,该模型并不能代表所有的 C3 和 C4 作物。此后,国外学者还建立了不同作物的临界氮浓度稀释曲线模型^[6-11]。

在小麦研究中, Justes 等^[9] 估算了法国冬小麦的临界氮浓度稀释曲线模型,该曲线被国外学者广泛应用^[12-13]。但有研究表明,同种作物的临界氮浓度稀释曲线模型的参数会因环境、作物品种的不同而改变^[4, 9, 14]。Yue 等^[14] 建立了华北平原冬小麦的临界氮浓度稀释曲线,其结果表明由于小麦生长环境和品种的不同,法国和中国华北平原的小麦临界氮浓度曲线有明显差异。赵犇等^[15] 基于临界氮浓度模型构建了小麦地上部氮营养指数模型和氮亏缺模型,表明不同蛋白质含量小麦品种的临界氮浓度模型有显著差异。以上研究表明,对特定作物来说,临界氮浓度稀释曲线的地区适用性研究是非常必要的。

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。但该地区作物高产主要依靠大量水氮投入,其中农户过量施肥问题很严重。张明等^[16] 通过田间氮肥肥效试验和农户调查,

发现陕西关中平原小麦和玉米的农民习惯施氮量分别为 211、310 kg/hm², 比推荐施氮量分别高 71、165 kg/hm², 而两者的产量没有显著差异。过量施用氮肥不仅会造成肥料的浪费、降低氮肥利用率,而且大量肥料流失还会造成环境污染。因此,需要一个简单有效的既能诊断氮不足又能诊断氮过量的氮素营养指标,用来指导农户合理施用氮肥,在提高产量的同时减少环境污染。

本文通过整理分析关中平原的氮肥试验结果,建立关中平原冬小麦临界氮浓度稀释曲线模型,利用由临界氮浓度曲线模型推导的氮营养指数 (NNI) 估测关中平原小麦氮素盈亏水平,验证曲线的合理性。

1 材料与方法

1.1 数据来源

收集整理了 2000—2014 年在关中平原开展的冬小麦氮肥试验的研究文献并对文献进行筛选。本研究文献筛选的标准为:①研究区域为关中平原。②氮肥水平为 4 个或以上。③试验为大田试验且至少设 3 次重复。④除氮肥处理外,其他管理条件如冬小麦品种、种植密度、病虫害杂草控制等要一致。⑤不同氮肥处理下各生育期的植株地上部生物量和含氮量测定方法要一致。经过筛选,最终获得符合标准的有效文献有 7 篇,共 130 组生物量和氮浓度数据。本研究中冬小麦品种均为关中平原主栽品种小偃 22,播种密度控制在 110 ~ 130 kg/hm²,植株生物量和含氮量测定均分别采用干燥法和凯氏定氮法,试验地土壤均为粉砂质粘壤土,每个试验点的收获时间、耕层土壤化学性质和取样时期见表 1。

1.2 试验设计

收集整理了 6 个氮肥试验。其中试验 1 ~ 5 用于比较不同氮处理下的冬小麦氮浓度稀释曲线以及建立关中平原的冬小麦临界氮浓度稀释曲线,试验 6 用于验证建立的冬小麦临界氮浓度稀释曲线。

试验 1、2、5 于 2003—2007 年在陕西省杨凌示

表 1 关中平原 6 个试验点的收获时间、采样时期和播前 0 ~ 20 cm 土壤化学性质

Tab.1 Harvest year, sampling stages and selected soil chemical properties (0 ~ 20 cm soil layer) before winter wheat planting at six experimental sites in Guanzhong Plain

试验 编号	试验 地点	收获年份	pH 值	硝态氮	有机质	全氮	有效磷	可交换	采样时期 (Feekes scale) ^[17]	文献序号
				质量比/ (mg·kg ⁻¹)	质量比/ (g·kg ⁻¹)	质量比/ (g·kg ⁻¹)	质量比/ (mg·kg ⁻¹)	钾质量比/ (mg·kg ⁻¹)		
1	农作一站	2005、2007	8.25	5.43	13.79	1.07	15.0	182.4	4、5、6、7、10	[18-19]
2	农作一站	2007	8.25	—	9.63	1.07	12.2	182.4	4、6、10、3	[20]
3	揉谷镇新集村	2005	—	—	12.70	1.40	24.4	146.9	3、4、6、10、5、2	[21]
4	五泉镇孟家寨	2005	—	—	12.30	0.96	15.9	138.8	3、4、6、10、5、2	[22]
5	农作一站	2003	8.28	—	15.87	0.67	13.3	189.9	3、4、6、10、5、2	[23]
6	农作三站	2011	—	—	12.10	1.24	27.8	146.5	3、4、6、10、5、2	[24]

注：冬小麦生育期用 Feekes scale(FS)法表示，其中 3、4、5、6、7、10、10.3、10.5、2 分别对应越冬、返青、起身、拔节、拔节中期、孕穗、抽穗、开花期。

范区西北农林科技大学农作一站试验地进行。每个试验点根据地力条件，设置了不同的氮肥梯度。其中试验 1 有 5 个氮处理，分别为：N0、N80、N160、N240、N320（N 后面的数字表示施氮量，单位 kg/hm²，下同）。试验 2 有 4 个氮处理，分别为：N0、N80、N160、N240。试验 5 有 5 个氮处理，分别为：N0、N60、N120、N180、N300。

试验 3、4、6 均有 4 个氮处理，于 2005—2011 年分别在扶风县揉谷镇新集村、杨凌示范区五泉镇孟家寨村和西北农林科技大学农作三站进行。其中试验 3 的氮处理为：N0、N105、N210 和 N315。试验 4 的氮处理为：N0、N75、N150 和 N225。试验 6 的氮处理为：N0、N120、N180 和 N240。

以上所有试验设置 3 ~ 4 次重复，随机区组设计。冬小麦在每年的 10 月中旬左右播种，在第二年的 6 月初左右收获。根据土壤中速效磷、钾的养分测定结果，所有试验在播种前施用充足的过磷酸钙（P₂O₅ 0 ~ 100 kg/hm²）和氯化钾（K₂O 0 ~ 216 kg/hm²）。氮肥的形态为尿素，试验 1、2、4、5 的氮肥作为基肥在冬小麦播前一次性均匀施入土壤。试验 3 氮肥基追比为 7:3，试验 6 氮肥基追比为 1:1，追肥时期均为拔节期。在冬小麦整个生长季及时做好田间管理，没有明显的干旱胁迫、病虫害等发生。

1.3 测定项目和方法

在冬小麦的出苗到收获期进行地上部生物量取样和作物含氮量的测定，每个试验具体取样时期如表 1 所示。每次取样时在各小区中部取 1 m 行植物样，收获时取 3 个 1 m² 的样方。植物样品按器官分离，105℃ 杀青 30 min，然后在 70℃ 下干燥至质量恒定，计算干物质量。取部分样品粉碎过筛后，用凯氏定氮法测定植株含氮量^[25]。对用于建立临界氮浓度稀释曲线的试验 1 ~ 5，共收集 114 组生物量和氮浓度数据。

应用 SPSS 软件进行方差分析，采用 Microsoft Office Excel 进行数据处理和绘图。

1.4 小麦临界氮浓度曲线构建

建立临界氮浓度稀释曲线时需要首先确定关键数据点，即基于 Justes 等^[9]定义的在某一地上部生物量下既不限制作物生长又不存在奢侈吸收的植株临界氮浓度。本研究构建临界氮浓度曲线的步骤为：①对比分析不同氮水平下每次取样的地上部生物量及相对应的氮浓度，通过方差分析对作物生长受氮素营养限制与否的氮素水平进行分类。②对于施氮量不能满足作物生长需求的试验资料，其地上部生物量与氮浓度间的关系以线性曲线拟合。③对于作物生长不受氮素影响的施氮水平，其地上部生物量的平均值用以代表生物量的最大值。④每次取样日的理论临界氮浓度由上述线性曲线与以最大生物量为横坐标的垂线的交点的纵坐标决定。

临界氮浓度稀释曲线模型为

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

式中 N_c ——临界氮浓度(质量分数)，%
 a ——小麦地上部干生物量为 1 t/hm²时的植株的临界氮浓度
 W ——小麦地上部生物量的最大值
 b ——稀释系数，是控制此曲线斜率的统计学参数

2 结果与分析

2.1 不同氮处理的氮浓度稀释曲线

试验 1 ~ 5 的 114 组数据中，地上部生物量的变化范围是 0.3 ~ 12.1 t/hm²，氮浓度变化范围是 1.0% ~ 4.2%。由于所收集试验在小麦越冬期取样较少，当地上部生物量小于 1 t/hm²时（取样数 $n = 5$ ），生物量和氮浓度的数据量较少且变异较大，两者之间没有显著关系（图 1a）。当地上部生物量大

于 1 t/hm^2 时 ($n=109$), 氮浓度随着生物量的增加而降低 (图 1b), 二者的关系为 $N_c=4.64W^{-0.46}$, 决定系数为 0.61。

当地上部生物量大于 1 t/hm^2 时, 由于各试验地肥力不同, 本研究根据不同氮肥处理下产量的方差分析结果将数据分为 4 组: 不施肥 (施氮量 $N=0$)、氮肥不足 ($60\text{ kg/hm}^2 \leq N \leq 120\text{ kg/hm}^2$)、施氮适宜 ($75\text{ kg/hm}^2 \leq N \leq 180\text{ kg/hm}^2$) 和过量施氮 ($150\text{ kg/hm}^2 \leq N \leq 320\text{ kg/hm}^2$), 得到不同氮肥处理下的氮浓度稀释曲线 (图 2a~2d)。这 4 组氮肥处理的平均施氮量分别为: $0(n=6)$ 、 $84(n=4)$ 、 $137(n=6)$ 、

242 kg/hm^2 ($n=9$), 其相对应的小麦平均产量分别为 $4\,263$ ($n=18$)、 $5\,097$ ($n=12$)、 $6\,023$ ($n=18$)、 $6\,203\text{ kg/hm}^2$ ($n=27$)。结果表明, 各试验地氮肥不足处理显著降低了产量, 而过量施氮处理的产量与适宜施氮量相比没有显著差异。

在不同氮肥处理下, 植株氮浓度均随生物量增加而降低, 而且较高的施氮量一般导致较高的植株氮浓度。在稀释曲线中 (式 (1)), 参数 a 代表当地上部生物量为 1 t/hm^2 时植株的氮浓度, 在 4 个氮肥处理中, 它是随着施氮量增加而增加的。参数 b 代表稀释系数, 在 $0.49 \sim 0.52$ 之间波动。

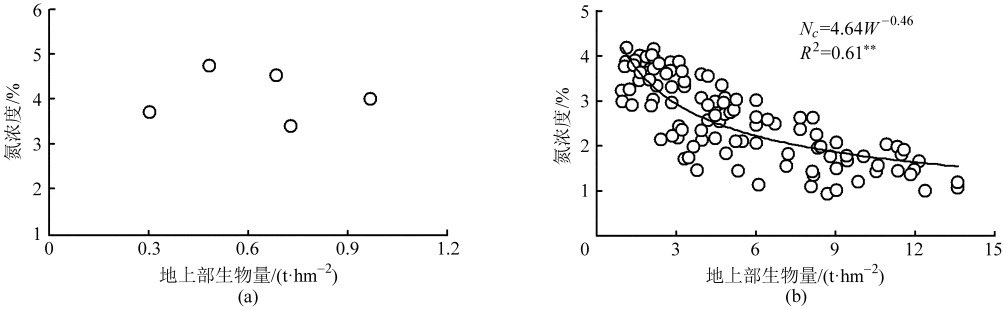


图 1 氮浓度和地上部生物量的关系
Fig. 1 Relationships between nitrogen concentration and aboveground biomass
(a) 地上部生物量小于 1 t/hm^2 (b) 地上部生物量大于 1 t/hm^2

2.2 冬小麦临界氮浓度稀释曲线的建立

建立临界氮浓度曲线的目的是通过营养诊断提高作物的经济产量, 但曲线本身反映的是地上部生物量和氮浓度的关系。因此, 本研究首先分析了小麦地上生物量 (W) 和经济产量 (Y) 的相关性。分析结果表明: 不同施氮水平下二者从返青期到开花期均呈显著正相关, 说明小麦生长期间的地上部生物

量越高, 最终产量水平也越高。返青期: $Y=0.86W+4.52$, $R^2=0.62$, $P<0.05$; 拔节期: $Y=0.44W+4.21$, $R^2=0.72$, $P<0.05$; 开花期: $Y=0.28W+3.55$, $R^2=0.64$, $P<0.05$ 。

在收集到的试验 1~5 中, 共有 25 个点满足临界数据点的定义 (表 2)。生物量 W 为 $1 \sim 11.77\text{ t/hm}^2$ 。根据这些数据点, 建立了关中平原冬小麦临界氮

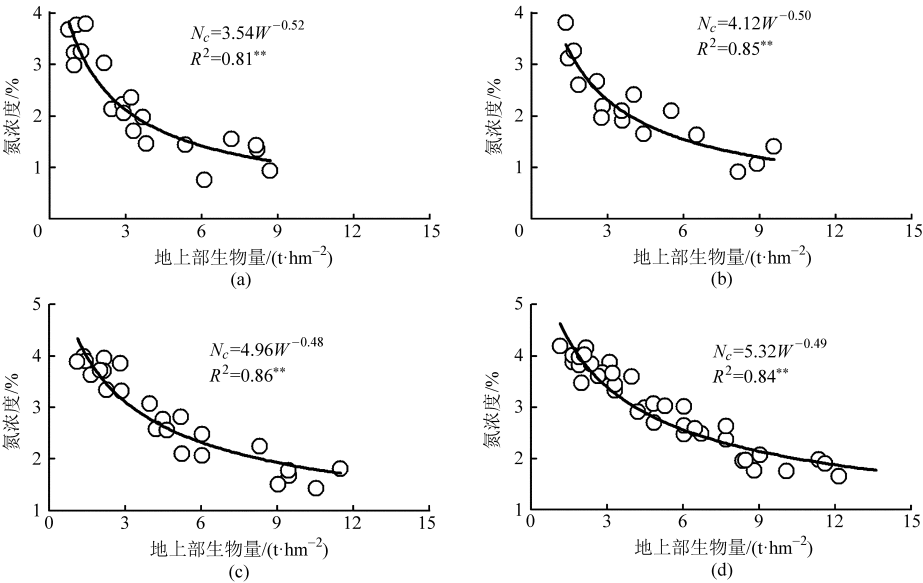


图 2 不同施氮处理下氮浓度和地上部生物量的关系
Fig. 2 Relationships between nitrogen concentration and aboveground biomass of winter wheat of different nitrogen treatments
(a) 不施氮 (b) 氮肥不足 (c) 适宜施氮 (d) 施氮过量

浓度稀释曲线： $N_c = 4.82 W^{-0.49}$ ($R^2 = 0.88^{**}$) (图 3)。

表 2 用于建立临界氮浓度稀释曲线的关键生物量
和氮浓度

Tab.2 Critical points selected to establish the critical nitrogen dilution curve					
试验 编号	试验 地点	收获 年份	采样时期 Feekes scale	地上部 生物量/ (t·hm ⁻²)	氮浓度 /%
4	五泉镇	2005	3	1.13	3.94
5	一站	2003	3	1.34	3.82
3	揉谷镇	2005	3	1.74	4.45
2	一站	2007	4	2.06	2.89
4	五泉镇	2005	4	2.17	3.95
1	一站	2005	4	2.85	2.97
3	揉谷镇	2005	4	2.93	3.39
1	一站	2007	4	3.07	2.29
1	一站	2005	5	3.10	2.44
1	一站	2007	5	3.96	2.34
2	一站	2007	6	4.47	2.17
1	一站	2005	6	4.48	2.77
4	五泉镇	2005	6	4.78	2.58
5	一站	2003	4	5.51	2.10
1	一站	2007	6	6.02	2.06
3	揉谷镇	2005	6	6.58	2.21
1	一站	2005	7	7.23	1.81
4	五泉镇	2005	10.5.2	8.74	1.71
1	一站	2007	7	9.04	1.47
1	一站	2005	10	9.87	1.30
1	一站	2007	10	10.05	1.68
3	揉谷镇	2005	10.5.2	10.56	1.36
2	一站	2007	10.3	11.58	1.25
5	一站	2003	10.5.2	11.74	1.69
5	一站	2003	6	11.77	1.50

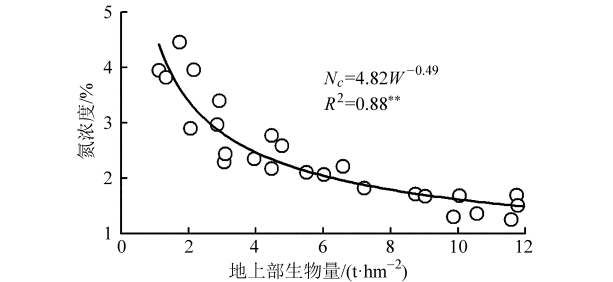


图 3 关中平原冬小麦临界氮浓度稀释曲线
Fig.3 Critical nitrogen dilution curve for winter wheat
in Guanzhong Plain

2.3 临界氮浓度稀释曲线的验证

基于临界氮浓度稀释曲线,前人定义了氮营养指数(NNI)的概念,即植株实际测定的氮浓度与临界氮浓度的比值^[26]。当 NNI 等于 1 时,表明氮肥用量适宜,当 NNI 小于 1 时,表示氮肥用量不足,当

NNI 大于 1 时,意味着氮肥用量过量。

基于建立的关中平原的冬小麦临界氮浓度稀释曲线,计算试验 1~5 的 NNI 值(图 4),4 组氮处理的 NNI 值分别为 0.70(不施肥处理)、0.89(氮肥不足处理)、1.01(施氮适宜处理)、1.25(过量施氮处理)。因此,关中平原冬小麦的适宜施氮量为 75~180 kg/hm²(平均 137 kg/hm²),不同试验地的适宜施氮量差异较大,表明不同试验地的土壤供氮能力不同,因此通过实时监控作物氮营养状况进行调整施肥是十分必要的。

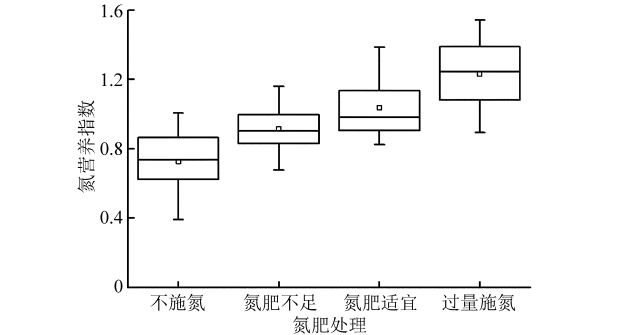


图 4 不同氮肥处理下的氮营养指数
Fig.4 Nitrogen nutrition index (NNI) for different
nitrogen treatments

为了进一步验证所建立的关中平原冬小麦临界氮浓度稀释曲线的合理性,应用独立试验 6 中的数据对曲线模型进行验证。如图 5 所示,随着施氮水平的提高,冬小麦氮营养指数不断上升。不同氮处理的 NNI 值分别表现为:N0 处理在各个生育期内的 NNI 值均小于 1(0.7~0.9),说明该处理的小麦生长受到了氮肥不足的限制;N120 处理在越冬期-开花期的 NNI 值接近于 1,表明氮肥供应适量,N180 和 N240 处理的 NNI 值在越冬期约为 1,在返青-开花期均大于 1(平均值分别为 1.1 和 1.2),表明这 2 个处理尤其是 N240 的氮肥是过量的,作物存在奢侈吸氮现象。该试验 N180 处理的产量为 6 927 kg/hm²,而 N240 处理的产量为 7 003 kg/hm²,过多施氮没有显著增加冬小麦产量。以上结果均表明,本研究所建立的关中平原冬小麦临界氮浓度稀释曲线可以应用于植株氮营养状况的诊断。

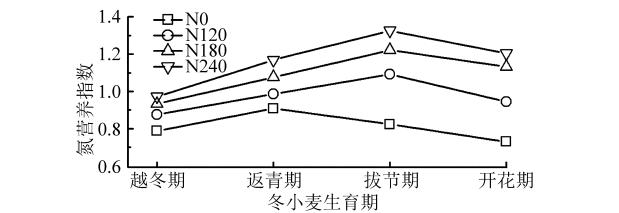


图 5 试验 6 不同氮处理条件下冬小麦氮营养指数
Fig.5 Nitrogen nutrition index (NNI) of winter wheat of
different nitrogen treatments for experiment six

3 讨论

3.1 小麦临界氮浓度稀释模型

近年来,许多学者构建了小麦的临界氮浓度稀释曲线模型,Justes 等^[9]构建了法国小麦临界氮浓度稀释曲线模型($N_c = 5.35W^{-0.44}$),Yue 等^[14]构建了中国华北平原的小麦(不分品种)临界氮浓度稀释曲线模型($N_c = 4.15W^{-0.38}$),赵犇等^[15]构建了小麦中蛋白含量品种($N_c = 4.65W^{-0.44}$)和低蛋白含量品种($N_c = 4.33W^{-0.45}$)临界氮浓度稀释曲线模型,将本研究建立的临界氮浓度稀释曲线模型和前人的模型结果对比后发现,尽管 Justes 等^[9]构建的模型在前人的研究中被广泛认可,但在相同地上部生物量下,本研究建立模型的临界氮浓度要低于 Justes 等的模拟值,但与 Yue 等^[14]和赵犇等^[15]建立的模型模拟值相近(图 6)。造成参数差异的主要原因可能是氮素水平设置、生态环境和小麦品种的差异。与 Justes 等^[9]所建模型参数差异大的原因主要有:①和法国冬小麦相比,关中平原较高的气温使冬小麦的营养生长期缩短,关中平原冬小麦的开花期在 5 月初,而法国冬小麦的开花期却在 5 月末。生育期的提前意味着叶片的遮阴以及新老器官中的竞争更激烈,导致了植株氮浓度的下降;而法国冬小麦较长的生长天数意味着冬小麦有更多的机会从土壤中吸收更多的氮,最终导致法国冬小麦籽粒氮含量要高于关中平原冬小麦。②Justes 等^[9]所选品种为高蛋白小麦,而本文的小偃 22 为中蛋白小麦,高蛋白小麦的根系更发达,在生长过程中能吸收更多的氮^[27]。

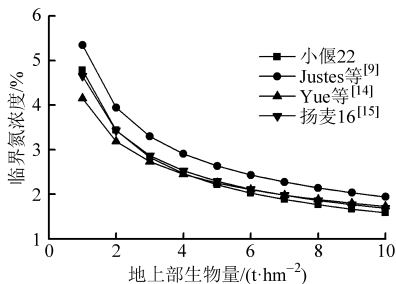


图 6 冬小麦临界氮浓度稀释曲线模型比较

Fig. 6 Comparison of different critical nitrogen concentration dilution curves for winter wheat

本研究通过整理分析关中平原 7 年的氮肥试验所构建的临界氮浓度稀释曲线模型虽然可较好地描述地上部生物量和氮浓度的关系,但是试验所选小麦品种均为小偃 22,对于其他小麦品种尤其是不同蛋白质含量的小麦品种和其他生态区,在利用该模型前仍需要对模型进行检验。此外,不同的栽培措施(覆膜、秸秆还田、种植密度、播期等)也可能会对

小麦临界氮浓度稀释曲线产生影响,因此,对于关中平原小麦其他品种的临界氮浓度稀释曲线,以及不同栽培措施下临界氮浓度稀释曲线的比较,还需进一步研究。

3.2 氮营养诊断和适宜施氮量

氮素营养诊断的方法很多,包括土壤无机氮测试法和植物全氮分析法,以及最近研究常用的叶绿素仪法和高光谱遥感法等^[1]。作物体内养分状况是土壤养分供应、作物对养分需求和作物对养分吸收能力的综合反映,因此,在这些方法中,通过测定作物含氮量是氮营养诊断最直接也是最准确的方法之一。基于临界氮浓度稀释模型推导的氮素营养指数(NNI)不仅可以诊断氮素营养状况,还可以量化作物氮胁迫强度。基于小麦临界氮浓度的地上部氮亏缺模型,结合氮肥利用率可定量确定小麦不同生长阶段的施肥量^[15]。但该方法在农业生产中并没有广泛推广,原因可能是作物全氮测定费时费力、临界氮浓度稀释曲线模型的普适性问题等。随着农业信息管理技术和作物模型的发展,以及对临界氮浓度模型研究的深入,应用作物模型对作物进行实时营养诊断可以实现农田氮素的更高效更精确管理。

关中平原流行在播前一次性施足底肥的施肥方法,这种粗放的肥料利用方式会造成肥料的很大浪费。本研究通过分析收集的关中平原冬小麦的氮肥试验,得出关中平原冬小麦的适宜施氮量为 75 ~ 180 kg/hm²,该结果表明了不同试验地的土壤供氮能力不同,通过实时监控作物氮营养状况不断调整施肥的必要性;需要注意的是,得出该结论的关中平原氮肥试验主要采用基施法,在根据小麦不同生育期的氮素需求制定的施肥制度中,其适宜施氮量可能会有不同。本文通过统计 4 种不同氮肥水平的产量,表明氮肥不足会显著降低产量,过量施氮不会显著增产,这与 Yue 等^[14]和张明等^[16]的结论相似。

4 结论

(1)关中平原小麦地上部临界氮浓度稀释曲线模型为 $N_c = 4.82W^{-0.49}$,在冬小麦生育期内,植株氮浓度随着生物量的增加而降低,而且较高的施氮量一般导致较高的植株氮浓度。和前人构建的小麦临界氮浓度稀释曲线相比较,关中平原的临界氮浓度稀释曲线和华北平原的曲线模型更接近(与法国曲线相差较大),这可能与生态环境和小麦品种特性有关。

(2)统计分析表明,氮肥不足显著降低了冬小麦产量,而过量施氮和氮肥适宜处理相比产量没有显著差异;关中平原冬小麦不同试验地的适宜施氮

量为 75 ~ 180 kg/hm²。

(3)对临界氮浓度稀释曲线的验证中,各生育期缺氮处理的 NNI 值一般小于 1,而施氮过量处理的 NNI 值一般均大于 1。表明所建立的关中平原冬小麦临界氮浓度稀释曲线可以很好地诊断植株的氮营养状况,有助于提高冬小麦生产的氮素精确管理水平。

参 考 文 献

1 李俊华,董志新,朱继正. 氮素营养诊断方法的应用现状及展望[J]. 石河子大学学报:自然科学版, 2003, 7(1): 80 – 83.
Li Junhua, Dong Zhixin, Zhu Jizheng. Present application and outlook for method of nitrogen nutrition diagnosis[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2003, 7(1): 80 – 83. (in Chinese)

2 陈新平, 李志宏, 王兴仁, 等. 土壤、植株快速测试推荐施肥技术体系的建立与应用[J]. 土壤肥料, 1999(2): 6 – 10.
Chen Xinping, Li Zhihong, Wang Xingren, et al. The construction and application of soil and plant quick testing and fertilizer recommendation system[J]. Soils and Fertilizers, 1999(2): 6 – 10. (in Chinese)

3 Ulrich A. Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1952, 3(1): 207 – 228.

4 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.

5 Lemaire G, Gastal F. Relationships between plant-N, plant mass and relative growth rate for C3 and C4 crops[C] //Proceedings of the First ESA Congress, 1990: 5 – 7.

6 Giletto C M, Echeverría H E. Critical nitrogen dilution curve for processing potato in Argentinean humid pampas[J]. American Journal of Potato Research, 2012, 89(2): 102 – 110.

7 Colnenne C, Meynard J, Reau R, et al. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape[J]. Annals of Botany, 1998, 81(2): 311 – 317.

8 Debaeke P, Van Oosterom E, Justes E, et al. A species-specific critical nitrogen dilution curve for sunflower (*Helianthus annuus* L.) [J]. Field Crops Research, 2012, 136: 76 – 84.

9 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.

10 Plenet D, Lemaire G. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration[J]. Plant Soil, 1999, 216(1 – 2): 65 – 82.

11 Sheehy J E, Dionora M J A, Mitchell P L, et al. Critical nitrogen concentrations: implications for high-yielding rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in the tropics[J]. Field Crops Research, 1998, 59(1): 31 – 41.

12 Jeuffroy M H, Recous S. Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization[J]. European Journal of Agronomy, 1999, 10(2): 129 – 144.

13 Stockle C, Debaeke P. Modeling crop nitrogen requirements: a critical analysis[J]. Developments in Crop Science, 1997, 25: 217 – 225.

14 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.

15 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)

16 张明, 同延安, 郭俊炜, 等. 陕西关中小麦/玉米轮作区氮肥用量及施氮现状评估[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(4): 152 – 158.
Zhang Ming, Tong Yan'an, Guo Junwei, et al. Determination of reasonable nitrogen use and evaluation of application status in wheat/maize rotation system in Guanzhong area of Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2011, 39(4): 152 – 158. (in Chinese)

17 Large E C. Growth stages in cereals illustration of the Feekes scale[J]. Plant Pathology, 1954, 3(4): 128 – 129.

18 张文伟. 氮磷对旱地冬小麦/夏玉米产量及水氮利用的影响 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2008.
Zhang Wenwei. Yield and utilization of water and nitrogen for winter wheat/summer maize affected by nitrogen and phosphorus on dry-land[D]. Yangling:Northwest A&F University, 2008. (in Chinese)

19 王荣辉. 氮磷对冬小麦产量形成和水分养分利用的影响 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2007.
Wang Ronghui. Formation of grain yield and utilization of water and nutrients for winter wheat affected by nitrogen and phosphorus [D]. Yangling:Northwest A&F University, 2007. (in Chinese)

20 赵新春. 小麦的氮效率及施氮对小麦氮、磷、钾吸收与转运的影响 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010.
Zhao Xinchun. Nitrogen efficiency and the effect of application of N fertilizer on N, P and K uptake and translocation of wheat [D]. Yangling:Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)

5 齐琳琳,于亮,于勇. 糙米的营养价值及其加工技术研究进展[J]. 中国食物与营养,2015,21(3):68-71.
Qi Linlin, Yu Liang, Yu Yong. Research advancement in the nutritional value and processing technologies of brown rice [J]. Food and Nutrition in China, 2015, 21(3):68-71. (in Chinese)

6 于巍,周坚,徐群英,等. 糙米与精米的营养价值与质构特性比较研究[J]. 食品科学,2010,31(9):95-97.
Yu Wei, Zhou Jian, Xu Qunying, et al. Comparison on nutritional values and textural properties of brown rice and milled rice [J]. Food Science, 2010, 31(9): 95-97. (in Chinese)

7 王赫男,王静. 糙米的综合利用[J]. 北京工商大学学报:自然科学版,2012,30(3):49-52.
Wang He'nan, Wang Jing. General utility of brown rice [J]. Journal of Beijing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2012, 30(3): 49-52. (in Chinese)

8 Jin Liang, Xiao Peng, Lu Yan, et al. Quantitative trait loci for brown rice color, phenolics, flavonoid contents, and antioxidant capacity in rice grain [J]. Cereal Chemistry, 2009, 86(6):609-615.

9 Ohtsubo Ken'ichi, Keitaro Suzuki, Yuji Yasui, et al. Bio-functional components in the processed pre-germinated brown rice by a twin-screw extruder [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2005, 18(4): 303-316.

10 Huang Q, Li L, Fu X. Ultrasound effects on the structure and chemical reactivity of cornstarch granules [J]. Starch, 2007, 59(8): 371-378.

11 García Pérez J V, Cárcel J A, S de la Fuente-Blanco S. Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed: parametric study [J]. Ultrasonics, 2006, 44(1): 539-543.

12 席细平,马重芳,王伟. 超声波技术应用现状[J]. 山西化工,2007,27(1):25-29.
Xi Xiping, Ma Chongfang, Wang Wei. Application situation of ultrasonic technology [J]. Shanxi Chemical Industry, 2007, 27(1): 25-29. (in Chinese)

13 陈晓明,李开绵,台建祥,等. 木薯皮总香豆素活性物质超声波提取工艺优化[J]. 农业机械学报,2012,43(1):158-165.
Chen Xiaoming, Li Kaimian, Tai Jianxiang, et al. Response surface methodology on ultrasonic extraction technology of total coumarin from Cassava Peel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 158-165. (in Chinese)

14 高振鹏,岳田利,袁亚宏,等. 超声波对糖化酶酶解作用的影响[J]. 农业机械学报,2012,43(10):138-142.
Gao Zhenpeng, Yue Tianli, Yuan Yahong, et al. Effect of ultrasonic on enzymolysis for glucoamylase[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 138-142. (in Chinese)

15 刘海飞,肖志刚,王娜,等. 稳态化米糠蛋白超声波辅助提取及其性质研究[J]. 农业机械学报,2014,45(11):235-241.
Liu Haifei, Xiao Zhigang, Wang Na, et al. Study on ultrasound-assisted extraction and properties of rice bran protein [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 235-241. (in Chinese)

16 Juliano B O, Bechtel D B. The rice grain and its gross composition[M]. United States of America: American Association of Cereal Chemists, 1985: 17-50.

(上接第 183 页)

21 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)

22 赵营. 冬小麦/夏玉米轮作体系下作物养分吸收利用与累积规律及优化施肥 [D]. 杨凌:西北农林科技大学,2006.
Zhao Ying. Nutrients uptake, utilization, accumulation and optimize fertilization under the winter wheat/summer maize rotation system [D]. Yangling:Northwest A&F Universtiy, 2006. (in Chinese)

23 赵满兴,周建斌,杨绒,等. 不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素累积、运输和分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(2):143-149.
Zhao Manxing, Zhou Jianbin, Yang Rong, et al. Characteristics of nitrogen accumulation, distribution and translocation in winter wheat on dryland[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(2): 143-149. (in Chinese)

24 陈毓君. 陕西关中冬小麦/夏玉米轮作体系下施肥对作物产量、养分吸收及累积的影响 [D]. 杨凌:西北农林科技大学,2012.
Chen Yujun. Effects of fertilizer application on yield, nutrient uptake and accumulation under the winter wheat/summer maize rotation system in Guanzhong area of Shaanxi [D]. Yangling: Northwest A&F Universtiy, 2012. (in Chinese)

25 Horowitz W. Official methods of analysis[M]. Washington, DC:AOAC, 1970: 17-18.

26 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[J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28(4): 614-624.

27 朱新开,郭文善,封超年,等. 不同类型专用小麦氮素吸收积累差异研究[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(2):148-154.
Zhu Xinkai, Guo Wenshan, Feng Chaonian, et al. Nitrogen absorption and utilization differences among wheat varieties for different end uses[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(2): 148-154. (in Chinese)