

关中地区玉米临界氮浓度稀释曲线的建立和验证

李正鹏^{1,3}, 宋明丹^{1,3}, 冯浩^{1,2,3*}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100)

摘要: 基于临界氮浓度稀释曲线推导的氮素营养指数既可以诊断出氮素供应不足也可以诊断出氮肥供应过量。该文在整理分析关中平原 8 a 氮肥大田试验的基础上, 分别构建了关中灌区夏玉米和渭北旱塬春玉米的地上部生物量的临界氮浓度稀释曲线模型。结果表明, 关中玉米地上部临界氮浓度与生物量符合幂函数关系。利用独立试验资料对建立的临界氮浓度稀释曲线模型进行检验, 结果表明: 该模型能准确诊断该区玉米植株的氮营养状况, 施肥量和施肥时期对玉米植株的氮素营养状况影响较大, 一般随着施氮量的增加氮素营养指数值会增大, 只基施氮肥或前期施氮过多都会使玉米在生长过程中营养失衡。该研究建立的关中地区玉米的临界氮浓度稀释模型为该区玉米氮素营养诊断和优化管理提供了较好的技术途径和理论参考。

关键词: 作物; N 肥; 诊断; 临界氮浓度稀释曲线; 氮素营养指数; 关中灌区; 渭北旱塬

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.13.019

中图分类号: S365; S512.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-13-0135-07

李正鹏, 宋明丹, 冯浩. 关中地区玉米临界氮浓度稀释曲线的建立和验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 135-141. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.13.019 http://www.tcsae.org

Li Zhengpeng, Song Mingdan, Feng Hao. Development and validation of critical nitrogen content curve for maize in Guanzhong area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(13): 135-141. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.13.019 http://www.tcsae.org

0 引言

作物含氮量(氮浓度)是土壤氮素供应和作物吸氮能力的综合反映^[1], 因此, 通过对作物含氮量进行诊断可以反映作物的氮营养状况, 并以此来进行施肥决策。研究表明, 作物生育期内干物质的累积速率大于养分吸收速率, 作物含氮量呈逐渐降低趋势^[2]。国外学者用“稀释曲线” $N=aW^{-b}$ 来描述作物氮浓度(N)随着地上部生物量(W)的增加而降低的过程^[3-4], 其中系数 a 为地上部生物量为 1 t/hm^2 时的氮浓度, b 为曲线的稀释系数。1990年, Greenwood等^[3]提出 C_3 和 C_4 植物临界氮浓度稀释曲线, 随后, Lemaire等^[4]通过大量试验修正了相关参数, 提出2个新模型($C_3: N=48W^{-0.34}$, $C_4: N=36W^{-0.34}$)。但此模型是基于多个试验平均得到的结果, 且供试作物有限, 所以不能代表所有作物。此后, 国内外有关学者针对不同作物开展相关研究并建立了棉花^[5]、马铃薯^[6]、小麦^[7-8]、玉米^[9]、大麦^[10]、向日葵^[11]、番茄^[12]等作物的参数模型。基于临界氮浓度稀释曲线, 前人定义了氮营养指数(nitrogen nutrition index, NNI)的概念^[13], 即地上

部实测氮浓度和临界氮浓度的比值。NNI=1时, 表明作物体内氮素营养合适, NNI>1表明氮营养过剩, NNI<1表明氮营养不足。

在玉米研究中, Plenet和Lemaire^[14]在1999年建立了法国春玉米的临界氮浓度稀释模型, 方程为 $N=34.0W^{-0.37}$, W 大于 1 t/hm^2 。德国的Herrmann和Taube^[15]和加拿大的Ziadi等^[16]分别在各自国家验证了法国春玉米临界氮浓度稀释曲线的适用性。Yue等^[9]建立了中国华北平原夏玉米临界氮浓度稀释曲线($N=27.2W^{-0.27}$), 由于气候环境、生育期长度和玉米品种差异的影响, 该曲线要低于欧洲春玉米临界氮浓度稀释曲线。从前人研究来看, 临界氮浓度稀释曲线在不同区域环境条件、作物、以及同一作物的不同品种间存在变异性^[8, 17]。因此, 在应用建立的曲线之前进行适用性研究是必要的。

关中地区位于陕西省中部, 是陕西省粮食主产区, 包括关中灌区(灌溉农业区)和渭北旱塬(旱作农业区)。基于2004-2010年关中农户调研数据^[20-21]表明, 关中地区夏玉米农户习惯平均施氮量在 240 kg/hm^2 以上, 产量仅 8.8 t/hm^2 , 施肥过量的农户占76%。过量施氮造成硝态氮在土壤中大量累积, 该地区降雨虽少, 却主要集中在7-9月, 季节性降雨可将 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失到较深土层, 增加硝态氮随水分淋溶风险^[22], 甚至威胁地下水安全^[23]。由于缺乏实用的玉米氮营养诊断工具, 大多数农民依然认为他们的氮肥用量是合适的, 甚至认为应该投入更多的氮肥以提高产量。因此, 农民需要一个简单、有效的氮营养诊断工具来指导氮肥的合理施用, 在提高产量的

收稿日期: 2014-12-15 修订日期: 2015-06-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA102904); 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, 男, 山东聊城人, 博士生, 主要研究方向为农业生态系统模拟研究。杨凌 西北农林科技大学, 712100. Email: lipengzheng131@163.com
*通信作者: 冯浩, 男, 陕西延安人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水土资源高效利用研究。杨凌 西北农林科技大学, 712100. Email: nercwsi@vip.sina.com

同时减少环境污染。本研究的目标是: 1) 建立并验证关中地区玉米(包括关中灌区夏玉米和渭北旱塬春玉米)的临界氮浓度稀释曲线; 2) 与 Plenet 和 Lemaire^[14]建立的法国春玉米、Yue 等^[9]建立的华北平原夏玉米临界氮浓度稀释曲线进行比较并分析差异原因。本文通过建立关中地区玉米的临界氮稀释模型旨在为该区农田玉米氮素营养诊断和优化管理提供较好的技术途径和理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究通过文献收集的方法, 整理分析了关中灌区 4 个试验点(2004—2012 年)的夏玉米氮肥试验和渭北旱塬 1 个试验点 4 a(2009—2012)的春玉米氮肥定位试验。其中试验 1~3 和 4 分别用于建立和验证关中灌区夏玉米

临界氮浓度稀释曲线, 试验 5 和 6 分别用于建立和验证渭北旱塬春玉米临界氮浓度稀释曲线。每个试验点的收获时间、玉米品种、土壤质地、耕层有机质含量等土壤化学性质和取样时期见表 1。

试验 1~3 在位于关中灌区的宝鸡市扶风和杨凌示范区进行, 其中试验 1~2 有 4 个氮肥处理: 0、125、250、375 kg/hm², 分别用 N0、N125、N250、N375 表示, 下同。N250 处理的施肥量是根据玉米目标产量 9 000 kg/hm² 时, 作物所需的 N、P、K 养分确定的。各处理的磷、钾肥用量相同(折合 P₂O₅ 45 kg/hm², K₂O 216 kg/hm²)。各处理 1/3 的氮肥追施在 7 叶期, 2/3 的氮肥在 V10 期追施。夏玉米播种后, 为确保出苗率, 每小区灌水 75 mm。试验 1 和 2 的种植密度分别为 4.8 和 5 万株/hm², 小区面积分别为 33.6 和 50 m²。

表 1 关中地区 5 个玉米田间试验点的收获时间、品种、土壤类型、0~20 cm 有机质等化学性质及取样时期

Table 1 Harvest year, variety, soil type, sampling stages and selected soil chemical properties (0-20 cm soil layer) before maize planting at 6 experimental sites in Guanzhong area

试验编号 No.	地点 Location	时间 Year	品种 Variety	土壤类型 Soil type	pH 值 pH value	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	速效磷 Olsen-P/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 NH ₄ OAc-K ⁺ /(mg·kg ⁻¹)	取样时间 Sampling stages	参考文献 References
1	扶风县新集村	2004	农大 108	壤土	-	12.7	1.40	24.4	146.9	V3, V6, V10, R2, R6	赵莹等 ^[18]
2	杨凌区孟家寨村	2004	沈单 10	壤土	-	12.3	0.96	15.9	138.8	V3, V6, V10, R2, R6	赵莹等 ^[19]
3	杨凌区黎张沟村	2012	秦龙 11	壤土	7.9	11.4	1.08	22.7	133.0	V6, R1, R6	李娜 ^[25]
4	杨凌区农作三站	2010	郑单 958	壤土	-	15.0	0.91	4.5	142.7	V6, V10, R2, R6	陈毓君 ^[26]
5	长武县王东村	2009—2011	先玉 335	黑垆土	8.4	15.5	0.95	15.9	136.7	V6, V10, R1, R3, R5, R6	Liu 等 ^[27]
6	长武县王东村	2012	先玉 335	黑垆土	8.4	15.5	0.95	15.9	136.7	V6, V10, R1, R3, R5, R6	陈迎迎等 ^[28]

注: Vn 为 n 叶期, R1 为吐丝期, R2 为灌浆期, R3 为乳熟期, R5 为蜡熟期, R6 为生理成熟期。

Note: Vn stands for n-leave stage, R1, R2, R3, R5 and R6 for silking, blister, milk, dent and psychological maturity stages, respectively.

试验 3 包括 2 个氮肥试验, 一个试验设 4 个氮肥处理, 分别为 N0、N100、N200、N300, 另一个设 5 个氮肥处理, 分别为 N0、N44、N150、N256、N300。播前分别施 142.5 kg/hm² K₂O 和 75 kg/hm² P₂O₅ 作为基肥, 氮肥分别在 V6 期和 V10 期追施, 2 个时期各施 50%, 在距夏玉米根 10~15 cm 处开沟条施。夏玉米播后灌溉 1 次。种植密度为 5.76 万株/hm², 小区面积 25 m²。

试验 4 设 5 个氮肥处理, 分别为 N0, FP (农民习惯施肥处理, 300 kg·N/hm²), N225、N300、N375。FP 处理氮肥全部基施(关中地区农户习惯采用这种被称为“一炮轰”的施肥方法), N225、N300 和 N375 处理的氮肥 60%在苗期施入, 40%在 V10 期追施。播种后和 V10 期分别灌水 50 mm。种植密度为 7.5 万株/hm², 小区面积 25 m²。

试验 5 和 6 在位于渭北旱塬的咸阳市长武农业生态试验站进行, 种植方式为春玉米/休闲。该试验有 6 个氮肥处理, 分别为 N0、N100、N200、N250、N300 和 N400。氮肥分 3 次施入, 40%的氮肥在播前均匀撒在土壤表面并翻入土壤, 30%的氮肥分别在 V10 期和 R1 期用点播机施入。播前每公顷施磷和钾分别为 40 和 80 kg/hm²。农田水分来源为天然降水。种植密度为 8.5 万株/hm², 小区面积 56 m²。

以上所有试验重复 3~4 次, 随机区组设计, 氮源为

尿素, 按照试验设计分别施用, 磷肥(过磷酸钙或重过磷酸钙)和钾肥(氯化钾)全部在播前均匀撒于小区后翻入地下作为基肥一次性施入。关中灌区夏玉米在每年的 6 月初冬小麦收获后播种, 在 10 月初收获。渭北旱塬春玉米在每年的 4 月下旬播种, 9 月份收获。在整个生长期内及时做好田间管理, 没有明显的干旱胁迫、病虫害等发生。不同试验点的玉米品种不尽相同, 但都具有大于 9 t/hm² 的产量潜力^[9], 且籽粒粗蛋白质量分数均在 9.5%~10%左右。详细的试验描述见表 1 中的参考文献。

1.2 取样和样品分析

在玉米的 V3—R6 时期进行地上部生物量取样和植株含氮量测定, 每个试验具体取样时期如表 1 所示。每次取样时, 为防止边际效应, 在各小区中部随机取 3~10 株玉米。植物样品按器官分离, 放入 105℃烘箱杀青 30 min, 在 70℃下烘至恒温称质量, 用粉碎机粉碎植物样品, 用凯氏定氮法分别测定各器官含氮量, 计算得到植株全氮含量^[29], 试验 1~6 总共收集到 222 组生物量和氮浓度的数据, 其中关中灌区和渭北旱塬分别为 78 和 144 组数据。

应用 SPSS 软件进行方差分析, 应用 Excel 进行数据处理和绘图。

1.3 数据分析

建立临界氮浓度稀释曲线, 首先需要确定关键数据

点,即基于 Justes 等^[7]1994 年所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如下:

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值,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值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:

$$N_c = a \cdot W^b \quad (1)$$

式中: N_c 为临界氮浓度值, g/kg ; W 为玉米地上部生物量的最大值, t/hm^2 ; a 为玉米地上部干生物量为 $1 t/hm^2$ 时的植株的临界氮浓度; b 为稀释系数,是控制此曲线斜率的统计学参数。

2 结果与分析

关中灌区的种植制度为冬小麦/夏玉米轮作,渭北旱塬的种植制度为冬小麦或春玉米单作。经过对所收集试验的初步统计,关中灌区夏玉米的播种密度为 6 万株/ hm^2 ,产量平均为 $7.5 t/hm^2$,变化范围 $5.5 \sim 10.5 t/hm^2$,生育期长度平均为 $105 d$;渭北旱塬春玉米播种密度为 8.5 万株/ hm^2 ,产量平均为 $11.6 t/hm^2$,变化范围为 $3.8 \sim 15.1 t/hm^2$,生育期长度平均为 $158 d$ 。较大的播种密度和生育期长度使渭北旱塬春玉米获得了更高的产量。Yue 等^[8]研究认为,同一地区夏玉米较短的生育天数和较低的产量可能会导致春、夏玉米的临界氮浓度稀释曲线不同。因此本研究将分别建立关中灌区夏玉米和渭北旱塬春玉米的临界氮浓度稀释模型。需要指出的是,与关中灌区夏玉米相比,渭北旱塬春玉米试验数据较少,本文仅收集到长武县的试验数据来说明曲线的建立和检验过程,长武站长期以来一直被作为渭北旱塬气候和土壤的典型代表,该地结果对旱塬其他区域有很重要的参考价值。

2.1 关中灌区夏玉米临界氮浓度稀释曲线建立和验证

对于关中灌区的 3 个夏玉米试验,本研究筛选出 14 组临界生物量及其氮浓度数据点(图 1),即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氮浓度。在这 14 组数据中,地上部生物量大于 $1 t/hm^2$ 的变化范围为 $1.4 \sim 15.9 t/hm^2$ ($n=11$),相应氮浓度的变化范围为 $9.0 \sim 21.5 g/kg$,生育期分布在 V6-R6 期。基于这 11 个数据点,建立了关中灌区夏玉米的临界氮浓度稀释曲线(图 1): $N_c = 22.5W^{0.27}$ ($W > 1 t/hm^2, R^2=0.92, P < 0.01$)。地上部生物量小于 $1 t/hm^2$ 的数据仅 3 组,变化范围为 $0.08 \sim 0.79 t/hm^2$,相应氮浓度的变化范围为 $22.9 \sim 24.5 g/kg$,平均值 $23.4 g/kg$,略高于 a 值(即 $W=1 t/hm^2$ 时由稀释曲线计算出的临界氮浓度)。

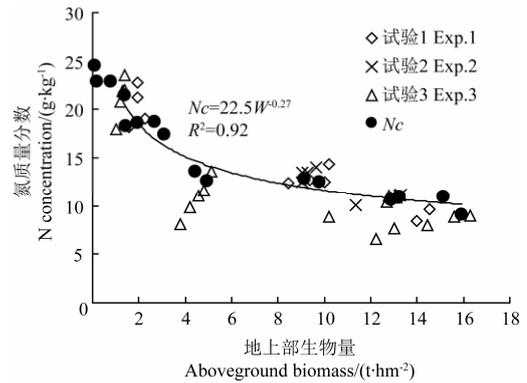
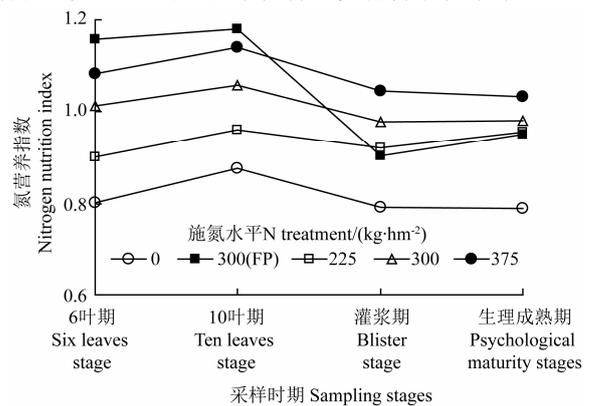


图 1 关中灌区夏玉米临界氮浓度值 N_c 曲线

Fig.1 Value and dilution curve of critical nitrogen content N_c for irrigated summer maize in Guanzhong Plain

为了验证建立的关中灌区夏玉米临界氮浓度稀释曲线的合理性,本研究利用试验 4 对该曲线进行了验证。如图 2 所示,由于土壤肥力较低,试验地中 N_0 和 N_{225} 处理在各个生育期内的 NNI 值均小于 1 (平均值分别为 0.81 和 0.93),说明这 2 个处理中玉米的生长受到了氮肥不足的限制; N_{375} 处理在各个生育期内 NNI 值均大于 1 (平均值 1.16),说明该处理的氮肥用量是过量的,玉米存在氮的奢侈吸收;农民习惯施肥 FP 处理在生育前期氮肥过量 (NNI 值平均 1.18),在生育后期氮肥不足 (NNI 值平均 0.91),说明关中地区常见的“一炮轰”(即只在播前一次性施氮肥)的施肥方法会造成前期氮肥的浪费,在后期氮肥供应不足又会限制作物生长;而 N_{300} 处理的 NNI 值基本在 1 左右,说明该处理的氮肥用量是适宜的。值得注意的是,FP 处理和 N_{300} 处理的施氮量相同,施肥时期不同,这说明不仅施肥量,施肥时期同样会影响作物的氮素营养状况,分期追施氮肥更能满足作物对氮素的需求。这些结果表明,新建立的关中灌区夏玉米临界氮浓度稀释曲线可以应用于玉米植株的氮营养状况诊断。



注: FP 为农民习惯施肥处理。

Note: FP is the fertilizing treatment used by farmer.

图 2 基于关中灌区夏玉米临界氮浓度 N_c 稀释曲线计算的试验 4 中各氮肥处理的 NNI 值

Fig.2 Nitrogen nutrition index (NNI) of summer maize at different N treatments for experiment 4

2.2 渭北旱塬春玉米临界氮浓度稀释曲线的建立和验证

对于长武的春玉米试验(试验 5),本研究筛选出 18 组临界数据点(图 3)。在这些数据点中,地上部生

物量大于 1 t/hm^2 的变化范围为 $2.6 \sim 23.0 \text{ t/hm}^2$ ($n=15$), 氮浓度的变化范围为 $10.3 \sim 21.6 \text{ g/kg}$, 生育期分布在 V10—R6 期。基于这 15 个数据点, 建立了渭北旱塬春玉米的临界氮浓度稀释曲线 (图 2): $N_c=25.3W^{0.26}$ ($W>1 \text{ t/hm}^2$, $R^2=0.87$, $P<0.01$)。地上部生物量小于 1 t/hm^2 的数据点仅有 3 组, 变化范围为 $0.38 \sim 0.47 \text{ t/hm}^2$, 氮浓度的变化范围为 $31 \sim 33.5 \text{ g/kg}$, 平均值 32.2 g/kg , 远高于 a 值。

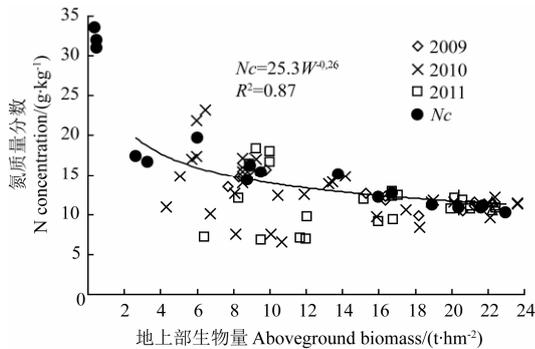


图 3 渭北旱塬春玉米临界氮浓度值 N_c 和曲线

Fig.3 Value and dilution curve of critical nitrogen for rainfed spring maize in Weibei Highland

基于 2009—2011 年试验数据建立的渭北旱塬春玉米临界氮浓度稀释曲线, 通过计算 2012 年各氮肥处理的 NNI 值对曲线进行验证。如图 4 所示, 总体来看, 该旱作试验的 NNI 值在生育期内的变化比灌区试验大, 且呈现前高后低的分布。N0 和 N100 处理在大部分生育期内的 NNI 值均小于 1 (平均值分别为 0.53 和 0.77), 说明这 2 个处理中玉米的生长受到了氮肥不足的限制; N300 和 N400 在各生育期内 NNI 值均大于 1 (平均值分别为 1.17 和 1.22), 说明这 2 个处理的氮肥用量是过量的, 玉米存在氮的奢侈吸收; 而 N200 和 N250 处理开花期前的 NNI 值大于 1 (平均值 1.36), 开花期后的 NNI 值基本在 1 左右 (N200 处理略低), 说明这 2 个处理播前和拔节氮肥追肥过量 (分别占总施氮量的 40% 和 30%), 而开花期以后的氮肥用量是适宜的 (占总施氮量的 30%)。这些结果表明, 新建立的渭北旱塬春玉米临界氮浓度稀释曲线可以应用于玉米植株氮营养状况的诊断。

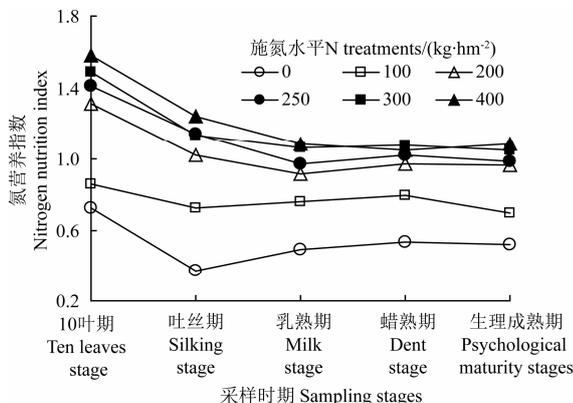


图 4 基于渭北旱塬春玉米临界氮浓度稀释曲线计算的试验 6 中不同氮肥处理各生育期的 NNI 值

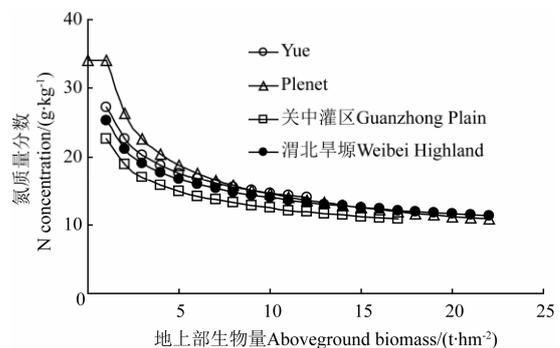
Fig.4 Nitrogen nutrition index (NNI) of spring maize in Weibei Highland at different N treatments for experiment 6

3 讨论

3.1 关中地区玉米临界氮浓度稀释曲线特征

作物含氮量是土壤供氮能力和作物吸氮能力的综合反映, 因此理论上来说, 凡是能影响土壤氮素转化和作物氮素吸收过程的因素都会对临界氮浓度稀释曲线产生影响, 比如不同试验地点的气候、土壤条件的差异造成的春夏玉米土壤供氮能力、作物生育期长短以及品种特性等。

Yue 等^[9]构建的中国华北平原夏玉米临界氮浓度稀释曲线模型, 与 Plenet 和 Lemaire^[14]构建的法国春玉米的临界氮浓度稀释曲线差异较大, 说明模型参数易受到环境和品种的影响。本文收集整理关中灌区夏玉米和渭北旱塬春玉米氮肥试验分别构建并验证了各自的临界氮浓度稀释曲线 (关中灌区: $N=22.5W^{0.27}$ 渭北旱塬: $N=25.3W^{0.26}$), 与 Yue 等^[9]构建的华北平原夏玉米临界氮浓度稀释曲线更接近, 与 Plenet 和 Lemaire^[14]构建模型参数差异较大 (图 5), 原因可能是: 1) 欧洲春玉米农田土壤为砂壤土^[14], 其氮素矿化率比关中灌区的粉黏壤土和渭北旱塬的黏土高, 而且在温带海洋性气候的影响下, 适宜的土壤温度和湿度也使微生物的活性更强^[30], 提高了土壤的供氮能力; 2) 玉米品种的差异 (尤其是玉米的氮素吸收效率和利用效率等) 也可能导致临界氮浓度稀释曲线不同。



注: 其中华北平原夏玉米 Yue 模型^[9]: $N=27.2W^{0.27}$, 欧洲春玉米 Plenet 模型^[14]: $N=34.0W^{0.37}$, 关中灌区夏玉米模型: $N=22.5W^{0.27}$, 渭北旱塬春玉米模型: $N=25.3W^{0.26}$ 。
Note: Model of Yue^[9] for summer maize in North China Plain: $N=27.2W^{0.27}$, Model of Plenet and Lemaire^[14] for spring maize in Europe: $N=34.0W^{0.37}$, Model for summer maize in Guanzhong Plain: $N=22.5W^{0.27}$, Model for spring maize in Weibei Highland: $N=25.3W^{0.26}$.

图 5 关中灌区夏玉米、渭北旱塬春玉米、华北平原夏玉米

(Yue) 和欧洲春玉米 (Plenet) 临界氮浓度稀释曲线比较

Fig.5 Comparison of critical N dilution curve for spring maize in Europe (Plenet) and Weibei Highland and summer maize in North China Plain (Yue) and Guanzhong Plain

虽然本研究没有比较不同玉米品种的临界氮浓度稀释曲线 (由于数据限制), 但赵犇等^[17]在冬小麦上的研究表明, 不同蛋白含量的小麦品种的临界氮浓度稀释曲线是有显著差异的。与法国春玉米相比, 关中地区和华北平原的玉米品种间的遗传特性更接近, 因此作物氮素的累积特性也更相近。实际上, 本研究所用到的农大 108、郑单 958 和先玉 335 等关中地区玉米主栽品种在华北平

原也得到广泛种植。但华北平原土壤多为壤土, 土壤肥力比关中地区高, 这可能是导致华北平原玉米临界氮浓度曲线高于关中地区曲线的原因。另外, 渭北旱塬春玉米的临界氮浓度稀释曲线要略高于关中灌区夏玉米(图 5), 原因可能是: 1) 渭北旱塬试验是在全膜双垄沟覆盖条件下进行的^[28], 土壤氮素未受降雨和灌水淋溶, 可能导致旱地作物氮浓度较高; 2) 春玉米的生育期比夏玉米更长, 可能使其在生长过程中累积更多的生物量和氮素^[9]。

临界氮曲线模型一般限定生物量 $W > 1 \text{ t/hm}^2$, 当生物量 $W < 1 \text{ t/hm}^2$ 时, 研究普遍认为作物幼苗时植株间对光照、养分的竞争很小, 不存在氮稀释现象。但对于此时期的临界氮浓度 N_c 值前人观点不同, 如 Justes 等^[7]、Plenet 和 Lemaire^[8]认为 $W < 1 \text{ t/hm}^2$ 时的植株 N_c 为固定值, 且等于模型参数中的 a 值; 而 Herrmann 等^[15]认为作物生长早期的 N_c 不应为固定值, 并发现此时期的 N_c 远高于模型参数中的 a 值。本研究结果表明: 夏玉米和春玉米 $W < 1 \text{ t/hm}^2$ 时的植株 N_c 值变化不大, 但都高于各自模型参数中的 a 值, 这和 Herrmann 等^[15]的研究结果一致。另一方面, 尽管对幼苗初期的氮浓度存在争议, 但并不影响利用所建立模型指导氮肥管理, 因为在拔节期以后玉米的需氮量才快速增加。

3.2 适宜施氮量和推荐施肥

氮素营养诊断的方法很多, 基于临界氮浓度稀释模型推导的氮素营养指数 (NNI) 不仅可以实时诊断作物不同生长阶段氮素营养状况, 还可以量作物氮胁迫强度。本文通过计算关中灌区和渭北旱塬不同氮处理的 NNI 值发现: 水分管理、施肥量和施肥时期都可能会影响作物的养分营养状况。1) 关中灌区试验 4 和渭北旱塬试验 6 的大部分氮肥都在开花前施入土壤, 但玉米在全生育期的 NNI 值的变化趋势不同, 渭北春玉米 NNI 值出现“前高后低”的现象, 这可能是由于关中灌区在夏玉米播后和大喇叭口期进行了灌水, 而渭北旱塬整个春玉米生长期没有灌溉, 且降雨相对较少, 土壤氮素过高导致作物生长前期作物氮浓度较高。2) 在相同的施肥时期下, NNI 值反映出了不同氮处理的氮营养状况, 一般随着施氮量的增加, NNI 值不断增加。3) 在施氮量相同时, 关中流行的“一炮轰”(在播前一次性施足底肥)的施肥方法, 可能会导致玉米生长前期氮素营养过剩, 后期氮营养不足, 不利于玉米产量潜力的实现^[18,32]。以往研究通常通过产量调查统计的方式得出关中地区的玉米适宜施氮量^[20-21, 33]。这种统计结果在宏观上有一定参考价值, 但在实际应用中有一定局限性, 比如将得出的“适宜施氮量”一次性施入土壤是不可取的, 应该综合考虑水分管理、施肥量和施肥时期对作物生长和产量的影响。

4 结 论

本文在收集、分析了关中平原大田氮肥试验资料的基础上, 分别建立了关中灌区夏玉米和渭北旱塬春玉米的地上部临界氮浓度稀释曲线模型。结果表明: 渭北旱塬春玉米的临界氮浓度稀释曲线 ($N=25.3W^{0.26}$) 要略高于关中灌区夏玉米 ($N=22.5W^{0.27}$)。和前人构建的玉米

临界氮浓度稀释曲线相比较, 关中平原的玉米临界氮浓度稀释曲线和华北平原的曲线模型更接近(和法国曲线相差较大), 这可能是由于气候、土壤等生态环境和玉米品种的相似性造成的。在临界氮浓度稀释曲线的验证试验中, 在不同的玉米生育期, 低氮处理的氮素营养指数一般小于 1, 高氮处理的氮素营养指数一般大于 1, 而中氮处理的氮素营养指数在 1 左右; 除了施氮量, 施氮时期也会影响 NNI 值, 只在播前施基肥和前期过量施肥后期施肥不足等不均施肥方式都可能造成前期营养过剩、后期氮素不足而限制作物生长, 分期追施氮肥更能满足玉米对氮素的需求。这些结果表明, 本研究所建立的关中平原玉米临界氮浓度稀释曲线可以很好的诊断植株的氮营养状况, 有助于提高玉米生产的氮素精确管理水平。

[参 考 文 献]

- [1] 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 with English abstract)
- [2] 宋海星, 李生秀. 玉米生长量、养分吸收量及氮肥利用率的动态变化[J]. 中国农业科学, 2003, 36(1): 71—76. Song Haixing, Li Shengxiu. Dynamics of nutrient accumulation in maize plants under different water and n supply conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(1): 71—76. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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.
- [4] Lemaire G, Gasta F. Relationships between plant-N, plant mass and relative growth rate for C3 and C4 crops[J]. Proceedings of the Proceedings first ESA Congress, Paris, France, 1990, 1.
- [5] 薛晓萍, 周治国, 张丽娟, 等. 棉花花后临界氮浓度稀释模型的建立及在施氮量调控中的应用[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1781—1791. Xue Xiaoping, Zhou Zhiguo, Zhang Lijuan, et al. Development and application of critical nitrogen concentration Dilution Model for cotton after flowering[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(6): 1781—1791. (in Chinese with English abstract)
- [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] 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.
- [8] 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.
- [9] Yue Shanchao, Sun Fulai, Meng Qingfeng, et al. Validation of a Critical Nitrogen Curve for Summer Maize in the North China Plain[J]. Pedosphere, 2014, 24(1): 76—83.

- [10] Zhao Ben. Determining of a critical dilution curve for plant nitrogen concentration in winter barley[J]. *Field Crops Research*, 2014, 160: 64—72.
- [11] 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.
- [12] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(18): 99—108. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Herrmann A, Taube F. The range of the critical nitrogen dilution curve for maize (*Zea mays L.*) can be extended until silage maturity[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(4): 1131-1138.
- [16] Ziadi N, Brassard M, Belanger G, et al. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for corn in eastern Canada[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(2): 271—276.
- [17] 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 with English abstract)
- [18] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(5): 622—627.
Zhao Ying, Tong Yan'an, Zhao Hubing. Effects of different N rates on nutrients accumulation, transformation and yield of summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(5): 622—627. (in Chinese with English abstract)
- [19] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同施氮量对夏玉米产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. *土壤肥料*, 2006(2): 30—43.
Zhao Ying, Tong Yan'an, Zhao Hubing. Effect of different N rates on yield of summer maize, fertilizer N recovery and N balance[J]. *Soils and Fertilizers*, 2006(2): 30—43. (in Chinese with English abstract)
- [20] 同延安, Emteryd O, 张树兰, 等. 陕西省氮肥过量施用现状评价[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(8): 1239—1244.
Tong Yan'an, Ove Emteryd, Zhang Shulan, et al. Evaluation of over-application of nitrogen fertilizer in China's Shaanxi Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(8): 1239—1244. (in Chinese with English abstract)
- [21] 尹晓芳. 关中农田氮肥利用及 NO₃-N 淋移特点[D]. 西北农林科技大学, 2010.
Yin Xiaofang. Characteristics of Nitrogen Fertilizer Utilization and Nitrate-N Leaching in the Guanzhong Area[D]. Northwest A&F University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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[J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 197—204.
Wang Xina, Wang Zhaohui, Li Shengxiu. The effect of nitrogen fertilizer rate on summer maize yield and soil water nitrogen dynamics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 197—204. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李世清, 李生秀. 半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 240—252.
Li Shiqing, Li Shengxiu. Leaching loss of nitrate from semiarid area agroecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 240—252. (in Chinese with English abstract)
- [24] Large E C. Growth stages in cereals illustration of the Feekes scale[J]. *Plant Pathology*, 1954, 3(4): 128—139.
- [25] 李娜. 夏玉米产量与氮硫吸收利用对氮硫肥的响应[D]. 西北农林科技大学, 2013.
Li Na. Response of Yield, and Nitrogen and Sulfur Uptake in Summer Maize to Nitrogen and Sulfur Application[D]. Northwest A&F University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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]. 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]. Northwest A&F University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [27] Liu Jianliang, Zhan Ai, Bu Lingduo, et al. Understanding dry matter and nitrogen accumulation for high-yielding film-mulched maize[J]. *Agronomy Journal*, 2014, 106(2): 390—396.
- [28] 陈迎迎, 沈玉芳, 白翔斌, 等. 全膜双垄沟覆盖条件下不同施氮量对春玉米氮素吸收利用及分配的影响[J]. *西北植物学报*, 2013, 33(11): 2278—2285.
Chen Yingying, Shen Yufang, Bai Xiangbin, et al. Effect of different nitrogen rates on nitrogen absorption and allocation of spring maize in double ridges mulched with plastic film[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, 33(11): 2278-2285. (in Chinese with English abstract)
- [29] Horowitz W. Official Methods of Analysis [M]. Washington, DC, AOAC, 1970.
- [30] 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2184—2188.
Wang Changhui, Xing Xuerong, Han Xingguo. Advances in study of factors affecting soil N mineralization in grassland ecosystems[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2184—2188. (in Chinese with English abstract)

- [31] 陈祥, 同延安, 亢欢虎, 等. 氮肥后移对冬小麦产量、氮肥利用率及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 450—455.
Chen Xiang, Tong Yan'an, Kang Huanhu, et al. Effect of postponing N application on the yield, apparent N recovery and N absorption of winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(3): 450—455. (in Chinese with English abstract)
- [32] 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 with English abstract)

Development and validation of critical nitrogen content curve for maize in Guanzhong area

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

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

2. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

3. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The nitrogen nutrition index (NNI), derived from the critical N concentration dilution curve, allows the discrimination between crop N status under shortage and surplus N supply. The on-farm survey results shows that nitrogen fertilizer is excessively used in maize production in Guanzhong Plain. However, the farmers are lacked of an efficient and simple nitrogen status diagnostic tool to guide the nitrogen application both for increasing crop yield and reducing widespread environmental pollution as well. The objectives of this study were to build and validate the applicability of the critical N concentration dilution curves for summer maize in Guanzhong irrigated area (with the whole growing period of about 105 d) and spring maize in Weibei dryland (with the whole growing period of about 158 d), respectively. The modeling procedure was as following: 1) to collect and analyze 8-site-year (2004-2012) field experiments data under different N application rates in the Guanzhong Plain according; and 2) to determine key points of the critical N concentration curve using data for modeling and to validate the curve using other independent data. Results showed that there existed a negative power function between aboveground maximum biomass (W) and critical N concentration (N_c) (summer maize: $N_c=22.5W^{-0.27}$; spring maize: $N_c=25.3W^{-0.26}$) when aboveground biomass was $>1\text{ t/hm}^2$. When aboveground biomass was $<1\text{ t/hm}^2$, the critical value was 23.4 and 32.2 g/kg for summer and spring maize, respectively. The critical N dilution curves were lower than that of spring maize in France and close to that of summer maize in North China Plain. The critical N dilution curves were validated through the NNI defined as the ratio between measured N concentration and critical N_c . The results showed that the nitrogen nutrition index model could be used for accurate diagnosis of maize plant nitrogen status and that plant nitrogen nutrition could be affected by both N application rates and dates, i.e., NNI value would generally increase with increasing N rates under a certain fertilization mode. For example, the average NNI value over summer maize growing season improved from 0.81 to 1.16 as the N rates increased from 0 to 375 kg/hm² in Guanzhong irrigated area, while the average NNI value over spring maize growing season increased from 0.53 to 1.22 for N rates from 0 to 400 kg/hm² in Weibei rainfed area. Maize would get nutrition imbalance when nitrogen was applied only as the basal fertilizer or with inappropriate fertilizer ratio of basal and topdressing. For example, for summer maize with 300 kg N/hm² applied only before planting, the NNI value were 1.18 and 0.91 in vegetative and reproductive growth period, respectively, indicating that extravagant and deficient N uptake in early and later maize-growing season. For spring maize with 70% N applied prior to anthesis date, over-supply of nitrogen was found in vegetative growth stage for all treatments of $N\geq 200\text{ kg/hm}^2$. The present critical N dilution curves could be used for the diagnosis of maize nitrogen nutrition, providing a key technical approach to precise N fertilization management in maize production in Guanzhong Plain.

Key words: crops; nitrogen fertilizers; diagnosis; critical N concentration dilution curve; nitrogen nutrition index; Guanzhong irrigated zone; Weibei Highland