

关中平原不同降雨年型夏玉米临界氮稀释曲线模拟及验证

强生才, 张富仓^{*}, 向友珍, 张燕, 闫世程, 邢英英

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100)

摘要: 过量施氮和降雨变率大是陕西关中平原夏玉米种植中常见的 2 大问题, 临界氮稀释曲线模型是诊断作物氮营养状况的有效手段。该研究选取关中平原主栽的 6 个夏玉米品种, 设置了 N_0 (0)、 N_1 (86 kg/hm²)、 N_2 (172 kg/hm²) 和 N_3 (258 kg/hm²) 共 4 个施氮水平, 在 2013 年 (生育前期正常, 后期大旱) 和 2014 年 (生育前期大旱, 后期偏涝) 这 2 种降雨年型下构建和验证了基于全生育期干物质的夏玉米临界氮稀释曲线。结果表明: 2 a 条件下临界氮浓度与地上生物量均符合幂指数关系, 但模型参数存在部分差异, 基于临界氮稀释曲线所建立的氮营养指数可用来诊断夏玉米氮盈亏状态, 诊断结果表明氮营养指数均随着施氮量的增加而增加, 且年型之间存在差异, 最优施氮量介于 86~172 kg/hm² 之间。制定不同降雨年型下夏玉米临界氮稀释模型对于指导精确施氮及生育季氮诊断具有重要的意义。

关键词: 降雨; 氮肥; 诊断; 夏玉米; 临界氮浓度; 氮营养指数; 关中平原

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.022

中图分类号: S365; S512.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-17-0168-08

强生才, 张富仓, 向友珍, 张燕, 闫世程, 邢英英. 关中平原不同降雨年型夏玉米临界氮稀释曲线模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 168-175. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.022 <http://www.tcsae.org>
Qiang Shengcai, Zhang Fucang, Xiang Youzhen, Zhang Yan, Yan Shicheng, Xing Yingying. Simulation and validation of critical nitrogen dilution curve for summer maize in Guanzhong Plain during different rainfall years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 168-175. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.022 <http://www.tcsae.org>

0 引言

作物高产以干物质累计为前提, 而较高的干物质累计以植物养分吸收为基础^[1]。农民基于提高产量和经济效益的目的, 过量施氮现象非常普遍, 很少关注作物在生长过程中氮素需求和供应之间的同步性^[2], 导致氮素利用效率偏低, 同时造成温室气体排放加剧和土壤及水体的污染^[3]。因此, 针对作物不同生育阶段优化供氮量对于提高氮素利用效率和环境保护具有重要的意义。

前人围绕植株体氮素精确诊断方面做了大量的研究, 例如通过测定叶片叶绿素^[4]、进行动态根区养分监测^[5]以及应用遥感技术^[6], 这些技术的应用对于优化施氮起到了很好的作用, 但是受技术和成本等因素的制约, 推广应用存在诸多困难。临界氮浓度被定义为在一定的生长期中最大生物量时的最小氮浓度^[7], 是作物氮素诊断的基本方法之一, 以作物器官 (叶和茎) 或者整株的干物质作为基础^[8]。基于干物质的临界氮稀释曲线模型中, 临界氮浓度 (N_c) 为作物地上部的干物质 (dry matter, DM) 的函数 $a \cdot DM^b$,

其中, 参数 a 代表作物干物质为 1 t 时的临界氮浓度^[9], 参数 b 代表临界氮含量的下降特性^[10]。前人建立了 C_3 和 C_4 作物的通用模型^[7], 但不同作物品种及生态气候区域之间存在一定的差异, 因此, 模型应用到一个新的气候区域和作物时, 需要进行模型参数的本地化。

夏玉米作为中国主要的粮食作物, 农业生产中大水大肥的现象非常突出, 基于临界氮稀释曲线的相关研究国内较少, 梁效贵等^[11]和 Yue 等^[12]在华北平原建立了无水胁迫条件下的氮稀释模型, 而作为另一夏玉米主产区的陕西关中平原, 仅李正鹏等^[13]通过总结关中灌区历年试验数据建立了夏玉米临界氮稀释曲线, 而事实上除了灌溉农业之外, 该区域旱地农业同样占据重要的地位。旱地农业由于缺乏灌溉条件, 因此生长季降雨量及其分配至关重要, 而受季节性降雨分配不均, 年季间变率大^[14]等因素的影响, 旱地夏玉米常遭受不同程度的水分亏缺, 而水分亏缺会影响夏玉米发育和干物质累计^[15], 同步影响植株体的氮素吸收过程^[16-17], 那么现有玉米氮稀释模型适用于关中旱地农业区吗? 降雨年型会影响模型的参数吗? 针对以上疑问, 本研究基于 2 a 田间试验, 分别建立和验证了关中平原基于地上干物质的临界氮素稀释曲线, 以期为该地区夏玉米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 试验地简介

收稿日期: 2015-06-17 修订日期: 2015-08-10

基金项目: 国家“十二五”863 计划项目课题 (2011AA100504); 教育部高等学校创新引智计划项目 (B12007)

作者简介: 强生才, 男, 甘肃白银人, 博士生, 主要从事农业生态系统模拟研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: qiangsc7631231@163.com

*通信作者: 张富仓, 男, 陕西武功人, 教授, 博士生导师, 主要从事水肥高效利用与研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

本试验在陕西西北农林科技大学节水灌溉试验站进行，该试验站位于 108°24'E、34°20'N，海拔 524.7 m，属于暖温带季风半湿润气候区，年平均温度为 12.9 °C，多年平均降水量介于 550~600 mm 之间（主要集中在 7、8、9 月），年平均蒸发量 1 500 mm。该试验区土壤质地为重壤土，0~100 m 土层的田间持水率（质量分数，下同）为 23%~25%，凋萎含水率为 8.5%，0~20 cm 土层的土壤 pH 值为 8.14，有机质质量分数为 12.02 g/kg，全氮质量分数为 0.89 g/kg，速效磷质量分数为 8.18 mg/kg，碱解

氮 55.3 mg/kg。

1.1.2 试验年份气象特征分析

为了能够量化 2 种降雨年型下夏玉米生长季的旱涝程度，本研究依照陆桂荣等^[18]基于降雨距平百分数 (Pr) 的方法来划分，即 $25\% \leq Pr < 50\%$ 之间为偏涝、 $-25\% < Pr < 25\%$ 之间为正常、 $-50\% < Pr \leq -25\%$ 之间为偏旱、 $-75\% < Pr \leq -50\%$ 之间为大旱。依据此标准 2013 年夏玉米生长季的降雨变率特征为（前期正常，后期大旱），而 2014 年为（前期大旱，后期偏涝），详情如表 1 所示。

表 1 2013 和 2014 年夏玉米生育季旱涝等级划分
Table 1 Drought and flood hierarchies of summer maize growth season in 2013 and 2014

年份 Year	06-15-08-05			08-05-成熟 August 5 to Maturity		
	降雨量 Rainfall /mm	降雨距平 Rainfall anomaly/%	旱涝等级 Drought flood hierarchies	降雨量 Rainfall /mm	降雨距平 Rainfall anomaly /%	旱涝等级 Drought flood hierarchies
2013 年	126.4	-6.9	正常 Normal	84.6	-58.6	大旱 Severe drought
2014 年	56.1	-66.5	大旱 Severe drought	336.2	33.3	偏涝 Partial flood
2003-2012 年	135.7	—	—	252.4	—	—

1.1.3 试验设计

试验分别于 2013 和 2014 年 6-10 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，2 a 分别选取了当地农民主栽的 6 个夏玉米品种，设置了 N_0 (0)、 N_1 (86 kg/hm²)、 N_2 (172 kg/hm²) 和 N_3 (258 kg/hm²) 共 4 个施氮水平，共计 24 个处理，各 3 次重复，各处理小区随机排列，其中 N_2 为推荐施氮量， N_3 为关中地区农民常见施氮量。氮肥选用尿素（含氮质量分数 46%），播种之前基施 30%，剩余 70%在拔节期一次性施完。此外施 P_2O_5 138 kg/hm²、 K_2O 138 kg/hm²，均作为基肥一次性施入。小区面积为 3 m×7 m=21 m²；播种密度为 60 000 株/hm²，2a 均于 6 月 17 日播种，分别于同年 10 月 1 日和 10 月 13 日收获，生育期内无灌溉，无明显病虫害和杂草出现，详情如表 2 所示。

表 2 用于夏玉米临界氮浓度曲线构建和验证的试验处理
Table 2 Treatments for constructing and validating critical nitrogen concentration curve of summer maize

年份 Year	数据点分类 Classification of data points	品种 Variety	氮肥用量 N-fertilizer amount (kg·hm ⁻²)	取样次数 Sampling times
2013 年	建模 Modeling	郑单 958、中科 11、先玉 335	0、86、172、258	5
	验证 Validation	武科 2 号、秦单 8 号、秦龙 11		
2014 年	建模 Modeling	郑单 958、中科 11、先玉 335	0、86、172、258	4
	验证 Validation	武科 2 号、秦单 8 号、秦龙 11		

1.1.4 夏玉米干物质、氮含量和产量测定

在夏玉米主要生育期（拔节期、吐丝期、灌浆期和成熟期）共计破坏性取样 5 次（2013 年）和 4 次（2014 年），每小区取样 3 株，3 次重复共计 9 株，在 105 °C 下烘 30 min，接着在 70 °C 下烘至恒质量，测定植株地上部整株干物质，最后用小型粉碎机粉碎，过 1 mm 筛，经

$H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮后通过凯氏定氮仪（FOSS 2300 型）测定植株体的全氮含量^[19]，(g/kg)。

在成熟期各小区随机选取 6 株，3 次重复共计 18 株，风干至籽粒水分质量分数为 14% 时测定产量。

1.2 模型描述

1.2.1 构建和验证临界、最小和最大氮素稀释曲线

构建基于干物质的氮素稀释曲线关键是找出临界数据点，即既不限制作物生长又不存在奢侈吸收的植株临界氮浓度。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，不存在氮奢侈吸收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 0.05。

依据 Justes 等^[8]提出的方法构建基于干物质的临界氮素稀释曲线：每次取样测定其干物质及其相应氮浓度值，通过方差分析对作物生长是否受氮素营养限制进行分类，若施氮量不能满足作物生长时，其地上部干物质和氮浓度之间通过线性关系拟合，若作物生长不受氮素限制，用其地上部生物量的平均值代表生物量的最大值，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。其中，基于干物质的临界氮稀释曲线公式如下：

$$N_c = a \cdot DM^{-b} \quad (1)$$

式中： N_c 代表作物临界氮含量，g/kg；DM 为作物地上部干物质，t/hm²；参数 a 代表作物干物质为 1 t 时的临界氮浓度^[9]；参数 b 为临界氮浓度稀释曲线斜率的统计学参数^[10]。

相同干物质下，氮浓度有很大的变异性，一般来说，施氮量越多氮浓度越大，因此本研究选取施氮量最多的（2013 和 2014 年的 N_3 处理）来建立最大氮浓度干物质曲线^[20] (N_{max})，选取无氮肥施入的（2013 和 2014 年的 N_0 处理）建立最小氮浓度干物质曲线 (N_{min})。

为了校验模型的精度,本研究通过计算标准化均方根误差 (n -RMSE) 和建立模拟值与观测值之间的 1:1 的直方图来评判模型的精度^[21-22]:

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

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

式中: s_i 和 m_i 分别为模拟值和实测值; n 为比较数据个数; m 是实测数据的平均值。一般认为,如果 n -RMSE < 10%, 则模型模拟性能极好; 如果 $10\% \leq n$ -RMSE < 20% 则认为模型模拟性能较好; 如果 $20\% \leq n$ -RMSE < 30%, 则认为模型模拟性能一般; 如果 n -RMSE $\geq 30\%$ 则认为模拟性能较差^[23]。

1.2.2 氮营养指数和相对产量计算

为了进一步明确作物生育期内的氮素营养状况,本研究采用氮素营养指数 (nitrogen nutrition index, NNI) 来评价:

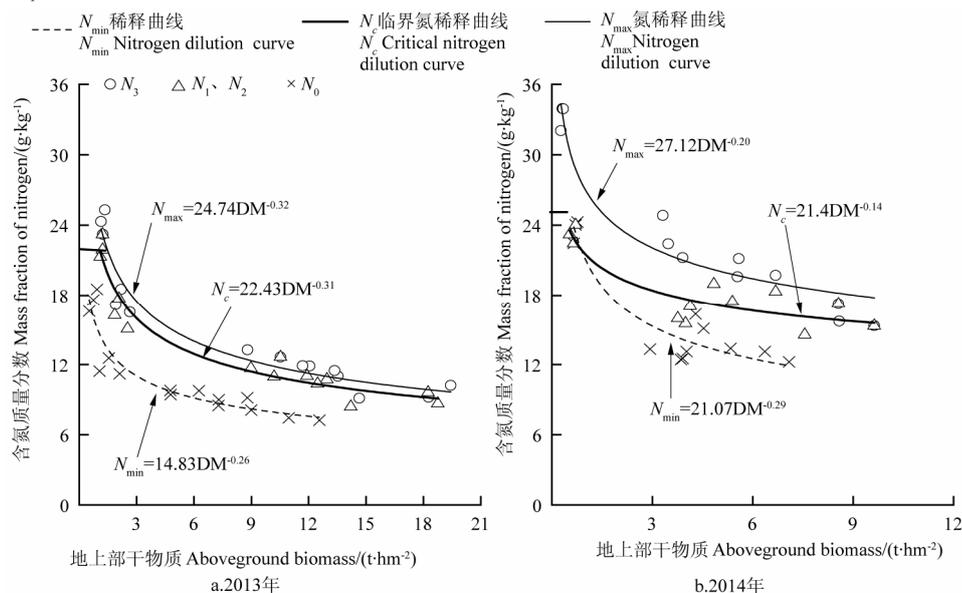
$$\text{NNI} = N_i / N_c \quad (4)$$

式中: N_i 为地上部生物量浓度实测值。NNI 反映作物体内氮素的营养状况, NNI=1, 氮营养状况适宜; NNI > 1, 表现为氮素营养盈余; NNI < 1, 表现为氮素营养亏缺。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^[24]。

1.2.3 氮素吸收模型的建立

夏玉米植株的氮素吸收量 (N_{uptc} , kg/hm^2) 与地上部干物质最大累计量 (maximum dry matter, DW_{max} , kg/hm^2) 之间的关系可用如下表达式:

$$N_{\text{uptc}} = N_c \cdot \text{DW}_{\text{max}} \quad (5)$$



注: N_{min} 和 N_{max} 为氮浓度最小和最大值; 图中数据表分别为各自对应处理下干物质质量显著大于前一取样点的数据点; $N_0 \sim N_3$ 分别为 4 个施氮水平: 0、86、172 和 258 kg/hm^2 。
Note: N_{min} and N_{max} are minimum and maximum of nitrogen content; Data points in figure are dry matter significantly higher than value obtained from last sampling point; $N_0 \sim N_3$ are 4 nitrogen fertilizer application rate of 0, 86, 172 and 258 kg/hm^2 .

图 1 基于地上部干物质的临界氮浓度稀释曲线

Fig.1 Critical nitrogen concentration curves based on aboveground biomass

将式 (5) 带入到式 (1) 即可得到夏玉米临界氮吸收模型:

$$N_{\text{uptc}} = a \cdot \text{DW}_{\text{max}}^{1-b} \quad (6)$$

式中: N_{uptc} 为临界氮吸收量, kg/hm^2 ; $1-b$ 为生长参数, 表征氮相对吸收速率与地上部生物量累计速率之比。

1.3 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2003 进行数据的基础整理和误差计算, 主要指标的显著性分析通过 SPSS18.0 软件中的 least significant difference (LSD) 多重比较法获得, 显著性水平设定为 $\alpha=0.05$, 图形通过 Origin8.0 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 临界氮稀释曲线构建及临界氮浓度常数的确定

临界氮稀释曲线的建立一般采取的是分段函数表示法: 第 1 段为临界氮浓度常数, 第 2 段为临界氮稀释曲线。如表 2 所示, 本研究分别从拔节期-成熟期取样 (2013 年) 5 次和 (2014 年) 4 次作为数据点, 用来构建临界氮稀释曲线, 由于 2a 降雨年型造成的生长之间的差异, 2a 干物质取值范围分别介于 1.1~19.6、0.2~9.6 t/hm^2 之间, 2013 年夏玉米全生育期干物质累计量显著高于 2014 年, 这主要与 2014 年苗期干旱导致作物生长受制, 从而错失最佳水热资源, 最终导致干物质增长缓慢有关。此外, 随着干物质的增加, 3 个品种的氮含量曲线均呈现出下降的趋势, 参数 b 值 2014 年小于 2013 年, 如图 1 所示。参数 a 的 95% 的置信区间在 2013 年为 [21.86, 22.79], 2014 年为 [19.99, 23.06], 可以看出两者差异不大, 两者的平均后, 其值为 21.91 g/kg 。由此可见, 降雨年型不会改变参数 a 值的大小。

临界氮素稀释曲线不适宜于生物量累计较少时，这是由于在生育初期生物量增加不会明显降低植株氮含量，因此不采用氮素临界稀释曲线来拟合初期，而代之以临界氮浓度常数，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的最大氮含量的平均值^[25]，经计算 2 a 临界氮浓度常数分别为 22.3 和 26.5 g/kg。2 a 建模所需数据点中的最小生物量分别为 1.15 和 0.63 t/hm²。综上，2 种降雨年型下夏玉米临界氮稀释曲线的分段函数，如式 (7) 所示：

$$2013\text{年 } N_c = \begin{cases} 21.91DM^{-0.31} & DM \geq 1.15 \\ 22.3 & DM \leq 1.15 \end{cases} \quad R^2 = 0.94, P < 0.01$$

$$2014\text{年 } N_c = \begin{cases} 21.91DM^{-0.14} & DM \geq 0.63 \\ 26.5 & DM \leq 0.63 \end{cases} \quad R^2 = 0.79, P < 0.05$$

(7)

2.2 夏玉米氮素稀释边界模型的建立

通过对夏玉米地上生物量和氮浓度的结果分析，地上生物量对应的氮浓度值存在很大的氮含量的变异性，如图 1 所示，本研究利用每个取样日所测得的氮浓度的最大、最小值 (N_{max} 、 N_{min})，得到 2 种降雨年型下夏玉米氮素稀释边界模型表达式：

$$2013\text{年 } \begin{cases} N_{max} = 24.74DM^{-0.32} & R^2 = 0.94, P < 0.01 \\ N_{min} = 14.83DM^{-0.26} & R^2 = 0.89, P < 0.01 \end{cases}$$

$$2014\text{年 } \begin{cases} N_{max} = 27.12DM^{-0.20} & R^2 = 0.91, P < 0.01 \\ N_{min} = 21.07DM^{-0.29} & R^2 = 0.88, P < 0.05 \end{cases}$$

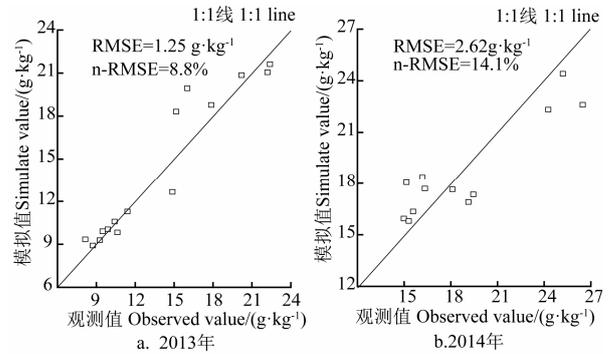
(8)

此外，从图 1 可以看出， N_{max} 最大值出现在 2014 年， N_{min} 的最小值出现在 2013 年，从 N_c 曲线与 N_{max} 和 N_{min} 的关系来看，2013 年 N_c 曲线和 N_{max} 曲线在参数 b 上无明显差别，只是 a 值略小；但是在 (2014 年) N_c 曲线在生育初期与 N_{min} 曲线相交，说明，参数 a 无差异，且随着生育期增加逐渐远离 N_{min} ，体现了氮素稀释速率较慢，表现为参数 b 值较小。

2.3 校验氮素临界稀释曲线

如表 2 所示，选取独立的夏玉米品种分别在 2013 年(数

据点=15) 和 2014 年 (数据点=12) 来校验模型的精度。其步骤为：将实测干物质数据点分别带入式 (7) 中计算临界氮含量模拟值，将模拟值分别与 2a 的观测值比较，结果如图 2 所示。2013 年模型偏差为 8.8%，<10%，为极好水平，而 2014 年偏差为 14.1%，介于 10%~20%之间，为较好水平。可见，所构建的 2 种降雨年型下的临界氮稀释曲线模型具有较好的精度，表明本研究所建立的 2 种降雨年型下的临界氮稀释曲线可进一步用于植株体的氮营养诊断。



注：RMSE、n-RMSE 分别为均方根误差和标准化均方根误差。
Note: RMSE and n-RMSE are root mean square of error and standardized root mean square of error.

图 2 临界氮含量观测值与模拟值比较
Fig.2 Comparison of observed and simulated critical nitrogen values

2.4 生育期内氮营养指数的变化过程

施氮量和降雨年型显著影响氮营养指数 NNI 的变化，如图 3 所示，NNI 随着施氮量的增加而增加。2013 年 NNI 的变化区间为 0.6~1.16，其中 N_0 、 N_1 处理均 <1，其值分别为 0.7 和 0.87，表明氮素抑制了夏玉米的干物质累计过程， N_2 处理为 1.0，表明其施氮量合理， N_3 处理其值 >1，表明，其植株氮营养总体过剩，超过了作物最大生物量累计所需的临界氮营养。2014 年 NNI 的变化区间为 0.71~1.31，其中 N_0 处理 <1，其值为 0.84， N_1 约为 1，其值为 0.99， N_2 和 N_3 处理均 >1，总体表现出氮素的过剩，综合考虑全生育期氮营养状况，2014 年的最佳施氮量应介于 N_1 ~ N_2 之间。

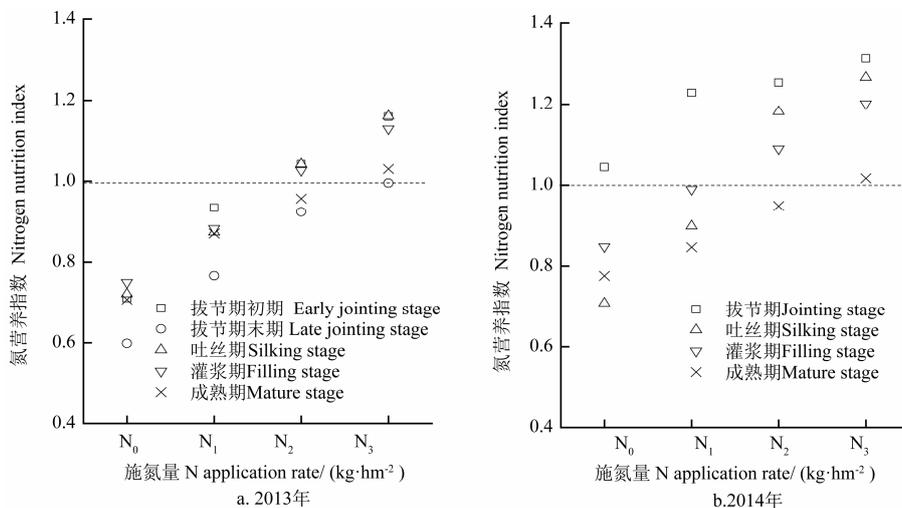


图 3 2013 和 2014 年不同施氮水平下夏玉米全生育期氮营养指数的变化

Fig.3 Change in N nutrition index of summer maize during whole growth stage under different N application rates in 2013 and 2014

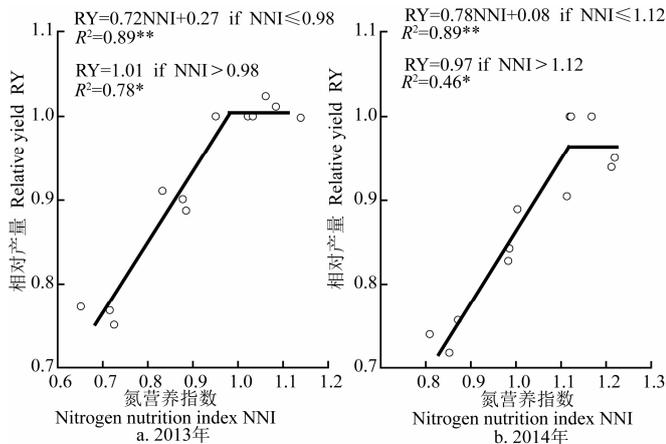
2.5 夏玉米氮素吸收模型的建立

建立基于临界氮稀释曲线的夏玉米氮素吸收速率可以量化最优氮环境下的吸氮规律, 从式 (9) 可以看出作物吸氮率的差异主要体现在参数 $1-b$ 上, 虽然 2014 年干物质累积较 2013 年明显低, 但是其氮素的累计速率参数 ($1-b$) 值总体高于 2013 年, 说明降雨年型影响夏玉米的氮素累积量, 而基于临界氮稀释曲线建立的 N_{uptc} 的吸氮模型的参数 ($1-b$), 其值 $2a$ 分别为 0.69 和 0.86。

$$(9) \quad \begin{cases} 2013\text{年} \begin{cases} N_{upmax} = 24.74DM^{0.68} \\ N_{uptc} = 21.91DM^{0.69} \\ N_{upmin} = 14.83DM^{0.74} \end{cases} \\ 2014\text{年} \begin{cases} N_{upmax} = 26.99DM^{0.82} \\ N_{uptc} = 21.91DM^{0.86} \\ N_{upmin} = 21.07DM^{0.71} \end{cases} \end{cases}$$

2.6 氮营养指数与相对产量的关系

建立 NNI 与相对产量 (relative yield, RY) 之间的关系, 可以从作物生长发育全过程的氮营养状态评价对产量的影响, 从图 4 可以看出, 随着施氮量的增加 NNI 和 RY 均呈现线性的增长趋势, 直到 RY 不随 NNI 的增加为止, 其变化趋势呈现出 (线性+平台) 模式, 该 RY 值最大时的 NNI 在 $2a$ 分别为 0.98 和 1.12, 这与拔节期各氮肥处理的 NNI 均显著大于 2013 年有关。



注: *和**分别表示 0.05 和 0.01 水平差异显著。

Note: * and ** indicates significance at 0.05 and 0.01 levels.

图 4 2013 和 2014 年夏玉米相对产量和氮营养指数的关系
Fig.4 Relationship between relative yield and N nutrition index of summer maize in 2013 and 2014

3 讨论

3.1 夏玉米临界氮浓度稀释曲线模型比较

本研究建立了关中平原夏玉米生长季 2 种降雨年型下的临界氮稀释曲线, 参数 a 值变异不大, 平均为 21.91 g/kg, 明显偏低, 而参数 b 介于 0.27~0.48 之内, 与国内外主要研究对比结果, 如表 3 所示。从数学的角度来讲, 参数 a 代表当干物质为 1 t/hm² 时的植株氮含量, 表征的是作物生育初期内在的需氮特性^[9], 在作物生长初期, 作物幼小, 基本不存在对养分和光热资源的竞争, 故采用

氮浓度常数来代替^[26], $2a$ 氮临界常数分别为 22.4 和 26.5 g/kg, 但随着茎秆的不断增长和叶片的遮蔽, 植株体的含氮量逐渐降低^[25], 出现了氮素的稀释现象。首先, 参数 a 与欧洲地区和中国东北地区相比, 明显偏低, 这可能与气候因素有关, 陕西关中平原属于暖温带季风半湿润气候区, 夏季炎热, 适宜种植夏玉米, 而欧洲的德国属于温带海洋性气候, 全年气候温暖, 东北属于大陆性季风, 气候温度较低, 以种植春玉米为主, 依据积温学说原理^[27], 则关中平原玉米生育期 (110 d) 小于欧洲 (德国) 和东北地区 (150 d), 生育期延长意味着植株体吸氮量增加^[28-29]。其次, 参数 a 与华北平原相比, 其值也略低, 原因主要与土壤因素有关, 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的原因^[13]。最后与关中平原李正鹏等^[13]所建模型参数相比, 差异不明显, 这表明在同一气候区域下, 参数 a 的大小具有稳定性, 不会随降雨年型的改变而改变。

表 3 不同玉米品种之间参数的比较

Table 3 Comparison of parameters of critical N dilution curve for different maize

品种 Variety	地域 Region	参数 a	参数 b	参考文献 Reference
春玉米 Spring maize	欧洲(德国, 法国)	34.1	0.37	Plenet 等 ^[30]
	中国东北	36.5	0.48	Li 等 ^[31]
夏玉米 Summer maize	中国华北平原	34.9	0.41	梁效贵等 ^[11]
		27.2	0.27	Yue 等 ^[12]
	中国关中平原	22.5	0.27	李正鹏等 ^[13]
		21.9	0.31	本研究
			0.14	

参数 b 描述的是植株氮含量随干物质增加的递减关系, 其大小主要决定于氮素吸收量与干物质的关系, 营养生长阶段植株体含氮量的下降主要归因于结构性和非光合性组织的增加^[32]。本研究所得参数 b 值在 2013 年为 0.31, 与前人相比, 处在范围之内, 但与同一气候区李正鹏等^[13]研究结果相比, 值偏大, 这可能与 2013 年夏玉米生育季后期大旱有关, 干旱导致根系活力降低^[33], 同步对土壤氮素的吸收降低, 从而导致植株体氮素稀释速率加快, 表现为参数 b 较大; 而在另一降雨年型 2014 年, 参数 b 值仅为 0.14, 明显偏小, 究其可能原因, 笔者划分生育前期和后期分段解释, 在生育前期, 高温干旱抑制了作物的生长与发育^[34-35], 较之于叶片, 干旱对茎干物质的累计影响更大^[36], 从而导致叶茎比的变小, 而叶片为活跃氮素存在的主要载体, 故植株体氮含量下降缓慢; 在生育后期, 与多年同期降雨相比, 2014 年降雨明显偏多, 外加气温降低, 导致干物质累计过程缓慢, 另外, 由于水分充裕导致夏玉米根系活力衰减过程趋缓^[33], 根系加大了对土壤氮素的利用, 从而减缓了植株体氮含量的稀释过程, 最终导致参数 b 明显偏小。本研究所建立的临界氮稀释曲线模型均基于 1a 的试验数据, 还需多年试验验证, 尤其是进一步探讨生育季后期的降雨量多寡是否为影响氮稀释曲线模型参数 b 的主要因素。

3.2 夏玉米边界氮浓度的变异分析

通过分析夏玉米氮含量的变异性, 可以探求出夏玉米生长发育所需的最小氮含量, 以及其最大的贮氮能力, 上述参数将被用来建立和验证模型, 并以此来预测氮营养状况和氮需求量^[37]。本研究通过 2 个边界(N_{\max} 和 N_{\min}) 曲线来表征, N_{\max} 代表了植株体最大的含氮量能力, 但是该值可能低于实际值, 可能由于: 1) 设置的施氮水平, 尤其是高氮处理, 尚不足以使植株体氮含量达到极限值; 2) 在夏玉米生育后期由于土壤氮素逐渐消耗以及降雨导致的氮淋失现象, 导致作物的吸氮量减小; 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^[25], 本研究中 N_0 处理虽然无氮肥施入, 但是考虑到土壤本身的供氮量、氮素干湿沉降^[38]和土壤氮的矿化^[39]等一系列因素, N_{\min} 可能高于实测值。

3.3 基于临界氮浓度稀释曲线和 NNI 夏玉米氮营养诊断

笔者建立临界氮稀释曲线的主要目的是通过农学的研究方法诊断作物的氮营养状态, 这种科学施氮技术可以降低由于过量施氮所造成的生产成本的提高和氮素的污染问题, 通过氮稀释曲线就可以诊断夏玉米生育阶段的氮素盈亏状态, 在农业实践中只要测定作物的干物质和植株氮含量, 就能依据 N_c 曲线来判定作物的氮营养状况: 如实测氮浓度在 N_c 曲线上时, 则表明施氮量最优; 介于 $N_{\min} \sim N_c$ 之间, 表示氮素的亏缺; 介于 $N_c \sim N_{\max}$ 之间则表示氮素的盈余, 存在奢侈的氮消耗。现已开发的能较好地用于区分作物的氮素亏缺和盈余状态的 CropSyst 模型^[40]就是以临界氮稀释曲线为基础进行需氮量计算的^[41]。

NNI 是一个作物群体氮营养状况的评价指标^[26], 可以诊断作物生育期内的氮营养状况, 2014 年的 NNI 总体大于 2013 年, 这与 2014 年夏玉米苗期干旱条件下, 土壤氮含量过高抑制夏玉米生长, 而同期低氮处理的干物质质量高^[34], 依据临界氮稀释曲线建模的思想, 其临界氮含量必然低, 如图 1b 所示, 这就造成 2014 年全生育期尤其是前期 NNI 整体偏大, 如图 3b 所示, 此外, 如式 (5) 所示, N_{uptc} 在 2014 年小于 2013 年, 表明在农业实践中生育前期干旱条件下应该减量施氮, 避免奢侈氮素含量的出现。

在 2013 年, 当氮营养指数 >0.98 时, RY 最高, 表明该年型下的最佳施氮量是 172 kg/hm^2 , 其所对应的 NNI 值与 Zhao^[42]所得结论中的 0.93 相近, 对应的最佳施氮量与梁效贵等^[11]所得结论夏玉米最优施氮量 180 kg/hm^2 相近, 而在 2014 年 RY 最高时的 NNI 为 1.12, >1.0 , 这可能主要由于前期干旱使得夏玉米生长季延长^[28-29], 从而导致各氮肥处理的 NNI 总体偏高, 其最优施氮量理论应介于 $N_1 \sim N_2$ 之间。

4 结 论

本研究在陕西关中雨养条件下, 建立了 2 种降雨年型下基于地上部干物质的临界氮稀释曲线模型, 从而证明了陕西关中平原夏玉米氮素变化遵循幂指数函数。就模型参数的变异性来看, 降雨年型不改变参数 a 的大小,

但会改变参数 b 的大小, 基于单位干物质累计速率 N_{uptc} , 2013 年植株体氮素的累计速率参数 $1-b$ 大于 2014 年。

本研究用氮营养指数 (nitrogen nutrient index, NNI) 来评判植株体的氮营养状况, 2 种年型下 N_0 处理的 NNI 均 <1 , 表明均存在氮素亏缺现象, N_3 处理 NNI 均 >1 , 表明均存在氮素盈余, 存在奢侈氮消耗; 氮营养指数最优 (NNI=1) 氮处理在 2014 年介于 $N_1 \sim N_2$ 之间, 而在 2013 年为 N_2 。从 NNI 和相对产量 (relative yield, RY) 的拟合来看, RY 最大时对应的 NNI 2 a 分别为 0.98 和 1.12。

[参 考 文 献]

- [1] Watt M S, Clinton P W, Whitehead D, et al. Aboveground biomass accumulation and nitrogen fixation of broom (*Cytisus scoparius* L) growing with juvenile *Pinus radiata* on a dryland site[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 184(1/2/3): 93-104.
- [2] Brye K R, Norman J M, Gower S T, et al. Methodological limitations and N-budget differences among a restored tall grass prairie and maize agroecosystems[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2003, 97(1/2/3): 181-198.
- [3] Godfray H C, Beddington J R, Crute I R, et al. Food security: The challenge of feeding 9 billion people[J]. *Science*, 2010, 327: 812-818.
- [4] Zheng Hongli, Liu Yanchun, Qin Yonglin, et al. Establishing dynamic thresholds for potato nitrogen status diagnosis with the SPAD chlorophyll meter[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(1): 190-195.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Ziadi N, Brassard M, Bélanger G, et al. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for corn in eastern Canada[J]. *Agron J*, 2008, 100(2): 271-276.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 梁效贵, 张经廷, 周丽丽, 等. 华北地区夏玉米临界氮稀释曲线和氮营养指数研究 [J]. *作物学报*, 2013, 39(2): 292-299.
- [12] Liang Xiaogui, Zhang Jingting, Zhou Lili, et al. Critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition index for summer maize in North China Plain[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(2): 292-299. (in Chinese with English abstract)

- [12] 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.
- [13] 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.
Li Zhengpeng, Song Mingdan, Feng Hao. Development and validation of critical nitrogen content 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)
- [14] 方建刚, 白爱娟, 肖科丽, 等. 陕西伏旱气候特征及成因分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(2): 28—34.
Fang Jiangan, Bai Aijuan, Xiao Keli, et al. Climatological characteristics of summer drought and its causes in Shaanxi Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(2): 28—34. (in Chinese with English abstract)
- [15] Wu Fuzhong, Bao Weikai, Li Fanglan, et al. Effects of drought stress and N supply on the growth, biomass partitioning and water-use efficiency of *Sophora davidii* seedlings[J]. *Environ Exp Bot*, 2008, 63(1/2/3): 248—255.
- [16] 王小彬, 蔡典雄, 张镜清, 等. 旱地玉米N吸收及其N肥利用率研究[J]. *中国农业科学*, 2001, 34(2): 179—186.
Wang Xiaobin, Cai Dianxiong, Zhang Jingqing, et al. Nitrogen uptake by corn and N recovery in grain in dry farmland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(2): 179—186. (in Chinese with English abstract)
- [17] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(4): 713—726.
Xing Yingying, Zhang Fucang, Zhang Yan, et al. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(4): 713—726. (in Chinese with English abstract)
- [18] 陆桂荣, 郑美琴, 袁安芳, 等. 日照市旱涝变化特征分析[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(3): 436—439
Lu Guirong, Zheng Meiqin, Yuan Anfang, et al. Characteristic of flood and drought changes in Rizhao City[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(3): 436—439. (in Chinese with English abstract)
- [19] Horowitz W. Official Methods of Analysis[M]. Washington DC, USA: AOAC, 1970.
- [20] 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)
- [21] Willmott C J. Some comments on the evaluation of model performance[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1982, 63(11): 1309—1313.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Xia Yao, Zhao Ben, Yong Chaotian, 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.
- [26] Lemaire G, Gastal F. Nitrogen uptake and distribution in plant canopies[M]//Lemaire G. *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Heidelberg: Springer-Verlag Publishers, 1997: 3—43.
- [27] 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 with English abstract)
- [28] Pommel B, Gallais A, Coque M, et al. Carbon and nitrogen allocation and grain filling in three maize hybrids differing in leaf senescence[J]. *European Journal of agronomy*, 2006, 24(3): 203—211.
- [29] Chen Xinping, Zhang Fusuo, Cui Zhenling, et al. Critical grain and stover nitrogen concentrations at harvest for summer maize production in China[J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102(1): 289—295.
- [30] Plenet D, Lemaire G. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops[J]. *Plant Soil*, 1999, 216(1/2): 65—82.
- [31] Li Wenjuan, He Ping, Jin Jiyun. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for spring maize in north-east china[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2012, 35(11): 1747—1761.
- [32] 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.
- [33] 刘小刚, 张富仓, 杨启良, 等. 玉米叶绿素、脯氨酸、根系活力对调亏灌溉和氮肥处理的响应[J]. *华北农学报*, 2009, 24(4): 106—111.
Liu Xiaogang, Zhang Fucang, Yang Qiliang, et al. Response of chlorophyll, proline and root activity of maize to regulated deficit irrigation and N fertilization treatment[J]. *Acta Agriculturae Boreali Sinica*, 2009, 24(4): 106—111. (in Chinese with English abstract)
- [34] Akbar Hossain, Jaime A Teixeira da Silva, Marina Viacheslavovna Lozovskaya, et al. High temperature combined with drought affect rainfed spring wheat and barley in South-Eastern Russia: I. Phenology and growth[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2012, 19(4): 473—487.
- [35] Kumar R, Sarawgi A K, Ramos C, et al. Partitioning of dry matter during drought stress in rainfed lowland rice[J]. *Field Crops Research*, 2006, 96(2/3): 455—465.
- [36] Maryam Hajibabae, Farhad Azizi, Kaveh Zargari. Effect of drought stress on some morphological, physiological and agronomic traits in various foliage corn hybrids[J]. *American-Eurasian J Agric & Environ*, 2012, 12(7): 890—896.

- [37] Casadebaig P, Guilioni L, Lecoeur J, et al. A model to simulate genotype-specific performance of sunflower crop in contrasting environments[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(2): 163–178.
- [38] Liu Xuejun, Zhang Ying, Han Wenxuan, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494: 459–462.
- [39] Guntiñas M E, Leirós M C, 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.
- [40] Stockle C O, Martin S, Campbell G S. CropSyst, cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield[J]. *Agricultural Systems*, 1994, 46(3): 335–359.
- [41] Stockle C O, Debaeke P. Modeling crop nitrogen requirements: A critical analysis[J]. *European Journal of Agronomy*, 1997, 7: 161–169.
- [42] Zhao Ben. Determining of a critical dilution curve for plant nitrogen concentration in winter barley[J]. *Field Crops Research*, 2014, 160: 64–72.

Simulation and validation of critical nitrogen dilution curve for summer maize in Guanzhong Plain during different rainfall years

Qiang Shengcai, Zhang Fucang*, Xiang Youzhen, Zhang Yan, Yan Shicheng, Xing Yingying

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Guanzhong plain of Shaanxi Province is one of the main productions of summer maize, and faces 2 problems: 1) Annual and seasonal large rainfall variability can significantly affect dry matter accumulation of summer maize and growth; and 2) Nitrogen fertilizer is excessively applied because the increase of nitrogen rate application does not synchronize with the increase of maize yield, but lead to a series of environmental problems. The existing crop nitrogen diagnostic tool is time-consuming and costly, so exploring simple and practical techniques for scientific nitrogen application is necessary such as nitrogen dilution curve. In this study, we constructed nitrogen dilution curves and validated its feasibility to diagnose nutrient status in Guanzhong plain. Six summer maize varieties and four nitrogen levels $N_0(0)$, $N_1(86 \text{ kg/hm}^2)$, $N_2(172 \text{ kg/hm}^2)$ and $N_3(258 \text{ kg/hm}^2)$ were applied to the study. The study was carried out in College of Water Resources and Architectural Engineering, Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi China ($108^\circ 24'E$, $34^\circ 20'N$) in 2013 and 2014. These two years were different with normal rainfall at early stage and drought at late stage in 2013 but drought in early stage and flooding in late stage in 2014. Aboveground biomass, nitrogen content and yield of summer maize were determined. Based on dry matter, the critical nitrogen dilution curves for summer maize were developed and validated. Results showed that exponential function with two parameters including critical N concentration for 1 ton dry matter (CC) and changes of critical N concentration (CR) could be used to describe relationships between the nitrogen concentration and the aboveground biomass in 2 years. In 2013, CC values were 21.91 and 22.3 for dry matter larger and lower than 1.5 t/hm^2 ; in 2014, CC values were 21.91 and 26.5 for dry matter larger and lower than 0.63 t/hm^2 , respectively; The CR values were 0.31 and 0.14 for the year of 2013 and 2014, respectively. The models were validated using data of another maize variety. The standardized root mean square error was 8.8% and 14.1% for the year of 2013 and 2014, indicating that the model fitness was well. The model parameter CC was not affected by years with different rainfall conditions. However, the parameter CR was greatly affected by years in that the value was higher in 2013 than 2014. Based on the critical N dilution curves, nitrogen nutrition index (NNI) was calculated to quantify the nitrogen nutrition status in main growth period of summer maize. The diagnostic results showed that NNI increased with N application rate and it was higher in 2014 than in 2013. The NNI was less than 1 for N_0 treatment, indicating N deficiencies, but greater than 1 in N_3 treatment, indicating excess N application. By analyzing relationship between NNI and relative yield, it was found that the optimal N application rate was 172 kg/hm^2 in 2013. The results can be used for the diagnosis of N nutrition in maize. It also can provide a key technical approach to precise N fertilization management in summer maize production in Guanzhong Plain.

Key words: precipitation; nitrogen fertilizers; diagnosis; summer maize; critical nitrogen concentration; nitrogen nutrition index; Guanzhong Plain