

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2013.00292

华北地区夏玉米临界氮稀释曲线和氮营养指数研究

梁效贵 张经廷 周丽丽 李旭辉 周顺利*

中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193

摘要: 为了验证玉米临界氮稀释曲线在我国华北地区的适用性, 探讨以氮营养指数评价玉米氮营养状况的可行性, 以郑单 958 为材料, 设置 5 个氮肥处理(0、60、120、180 和 240 kg N hm⁻²), 利用 2 年定位试验数据研究了夏玉米临界氮稀释曲线和氮营养指数。结果表明, 一定范围内随着施氮量增加, 地上部生物量(W)显著增长。玉米各生育时期不同氮肥处理的生物量和氮浓度数据可经统计分析分为限氮和非限氮两组, 据此计算各生育时期临界氮浓度(N_c)并建立了夏玉米临界氮稀释曲线模型($N_c = 34.914W^{-0.4134}$), 模型参数与已有报道具有较好的相似性。根据模型推算的氮营养指数与相对氮累积量、相对地上部生物量和相对产量均具显著相关性。因此, 利用临界氮稀释曲线和氮营养指数可以预测华北地区夏玉米植株临界氮含量和表征植株氮营养状况。

关键词: 夏玉米; 植株氮浓度; 临界氮稀释曲线; 氮营养指数; 氮营养诊断

Critical Nitrogen Dilution Curve and Nitrogen Nutrition Index for Summer Maize in North China Plain

LIANG Xiao-Gui, ZHANG Jing-Ting, ZHOU Li-Li, LI Xu-Hui, and ZHOU Shun-Li*

College of Agronomy & Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract: In order to verify the applicability of critical nitrogen (N) dilution curve for summer maize in North China Plain, and the feasibility of N nutrition index (NNI) in evaluating N nutrition status of maize plant, a 2-year experiment with five N-fertilizer treatments (0, 60, 120, 180, and 240 kg N ha⁻¹) was conducted using the cultivar Zhengdan 958. The results showed that the above ground biomass (W) increased significantly with increasing N-fertilizer application within a certain range. The data of above ground biomass and corresponding N concentration for each sampling stage were divided into N limited group and N non-limited group based on the statistical results, then the critical N concentration (N_c) was calculated and the critical N dilution curve model ($N_c=34.914W^{-0.4134}$) for summer maize was established, and the model parameters had a good similarity to these reported. NNI calculated based on the critical N dilution curve model had a significant correlation with relative N uptake amount, or relative above ground biomass or relative yield. Therefore, critical N dilution curve and NNI can be used to predict plant N_c and characterize plant N status in summer maize in North China Plain.

Keywords: Summer maize; Plant N concentration; Critical N dilution curve; N nutrition index; N nutrition diagnosis

氮是玉米需求量最大的元素, 玉米对氮肥尤其敏感^[1-2], 合理的氮肥供应是调控玉米生长发育, 改善光合性能, 提高产量的关键^[3-5], 而明确不同生育阶段玉米的氮需求特征是合理施肥的基础。早在 1952 年, Ulrich^[6]就提出了“临界氮浓度(critical N concentration, N_c)”的概念, 即获得最大生物量增长所需要的最少氮素营养。研究发现, 作物体内的临

界氮浓度(N_c , g N kg⁻¹ DM)随着地上部干物重(W, t hm⁻²)的增长而降低, 且二者存在幂函数关系, $N_c = aW^{-b}$ (a 、 b 为方程参数), 即临界氮稀释曲线。Greenwood 等^[7]研究表明, 当地上部生物量大于 1 t hm⁻² 时, C₃ 和 C₄ 作物之间的关系也可用上式描述, 系数 b 为-0.5, 系数 a 分别为 5.7 和 4.1, 但由于此模型是由多个试验的平均结果得到的, 同时供试作物

本研究由新世纪优秀人才支持计划(NETC-10-0790), 国家自然科学基金项目(31071367)和国家公益性行业(农业)科研专项(200903007, 201203031)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 周顺利, E-mail: zhoushl@cau.edu.cn, Tel: 010-62732431

第一作者联系方式: E-mail: liangxiaogui_cau@126.com

Received(收稿日期): 2012-07-16; Accepted(接受日期): 2012-10-09; Published online(网络出版日期): 2012-12-11.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20121211.1613.002.html>

有限, 因此很难代表所有 C_3 和 C_4 作物。此后, 小麦^[8]、油菜^[9]、水稻^[10]、高粱^[11]、土豆^[12]等作物先后建立了各自的参数模型。2006 年, 国内学者薛晓萍等^[13-14]首次在棉花上研究并建立了花后临界氮浓度稀释模型。

在玉米研究中, Plènet 和 Lemaire^[15]于 2000 年在法国建立了临界氮浓度与地上部干物重的幂函数曲线模型($N_c = 34.0W^{-0.37}$), 同时限定此模型适用于生物量大于 1 t hm^{-2} 直到吐丝后 25 d 左右。4 年后, Herrmann 和 Taube^[16]在德国证明其适用范围可延伸至成熟期, a 、 b 参数稍有不同($N_c = 34.12W^{-0.391}$)。随后在澳大利亚^[17]和加拿大^[18]的研究也证实了该曲线的可靠性。基于临界氮浓度, 氮营养指数(Nutrition index, NNI)被定义为实际氮浓度与临界氮浓度的比值, 可以作为评价氮营养状况的一个可靠指标^[18-19]。但是, 有学者指出临界氮浓度与地上部干物重的幂函数曲线模型的参数可能因试验地区或作物的不同出现差异^[7-8,12], 因此对特定作物来说其地区适用性研究就显得非常必要。本试验的目的就是研究玉米临界氮稀释曲线在我国华北地区的适用性以及利用氮营养指数估测玉米植株氮素盈亏水平的可行性, 以期为我国玉米氮肥合理施用提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况

试验区位于海河平原黑龙江流域中部($37^{\circ}29' \sim 37^{\circ}47'N$; $116^{\circ}19' \sim 116^{\circ}42'E$), 暖温带季风气候, 海拔 14~22 m, 历年平均降水量 562 mm, 主要分布在 6~8 月份。试验地土壤为冲积型盐化潮土, 地下水位 7~9 m。耕层土壤 pH 8.2, 含有机质 16.2 g kg^{-1} 、全氮 0.96 g kg^{-1} 、碱解氮 54.2 g kg^{-1} 、速效磷 25.9 g kg^{-1} 、速效钾 126 g kg^{-1} 。

1.2 试验设计

2009—2010 年在河北省吴桥县中国农业大学吴桥实验站种植华北地区夏玉米推广品种郑单 958, 肥料定位研究中设 5 个氮肥处理, 即 0 kg N hm^{-2} (N_0)、 60 kg N hm^{-2} (N_{60})、 120 kg N hm^{-2} (N_{120})、 180 kg N hm^{-2} (N_{180})和 240 kg N hm^{-2} (N_{240})。采用完全随机区组设计, 2009 年 3 次重复, 2010 年 4 次重复。小区面积为 70 m^2 ($10 \text{ m} \times 7 \text{ m}$), 各小区之间设 1.0 m 宽的间隔区。

2009 年 6 月 13 日播种, 10 月 3 日收获; 2010 年 6 月 22 日播种, 10 月 10 日收获。每穴播 3 粒, 留苗

密度每公顷 60 000 株, 行距 60 cm, 株距 27.7 cm。三叶期间苗, 五叶期定苗。开沟基施氮肥 40%, 另 60%于大喇叭口期开沟追施, 其他肥料均按照当地习惯一次性基施(P_2O_5 138.5 kg hm^{-2} , K_2O 113 kg hm^{-2} 和 $ZnSO_4$ 30 kg hm^{-2})。

1.3 测定内容与方法

分别于玉米七叶展、十三叶展、吐丝期、吐丝后 12 d、吐丝后 24 d、吐丝后 40 d 和成熟期取样, 每小区选取长势具有代表性的植株(小区平均株高和平均茎粗的植株) 3 株。将样株去根, 按器官分干于 $105^{\circ}C$ 下杀青 1 h, $80^{\circ}C$ 烘至恒重后称干重。粉碎并充分混匀烘干样品, 用凯氏定氮法测定全氮含量, 并计算植株全氮含量。

玉米成熟期取各小区中间 4 行实收测产, 按大小穗比例及平均穗重取 10 穗室内考种, 测定籽粒含水量。以含水量 14%计算各小区籽粒产量。

1.4 相关指标计算方法

1.4.1 临界氮浓度 对于作物临界氮稀释曲线的建立或验证, 首先需要确定临界氮浓度。其确定方法有二。

第一种方法是由 Justes 等^[8]于 1994 年提出的, 包括以下 2 步: (1)数据分组。作物生长对氮素的反应可以分为 2 种情形, 一是随施氮量增加作物地上部生物量显著增加, 表明作物生长受氮素供应不足的限制; 二是尽管氮吸收量可能增加, 但地上部生物量并未出现显著增加, 即生长不受氮素制约。对不同施氮处理的每次取样数据进行差异显著性分析, 根据显著性结果将数据分为氮制约组和不受氮制约组。(2)对 2 组数据的地上部生物量(x)和对应氮浓度值(y)分别进行回归曲线拟合, 每次取样日的临界氮浓度由上述 2 类曲线的交点的纵坐标决定。

第二种方法是 Herrmann 和 Taube^[16]为解决相邻的氮素处理水平结果相近、显著性不高而提出的, 他们认为植株生物量随氮含量增加呈先增加后趋缓最后不再增加的趋势, 并据此将同时期不同处理得到的数据放在一组, 对生物量和氮含量之间的关系以分段函数拟合。

$$W = \begin{cases} a \cdot N_a^2 + b \cdot N_a + c & N_a < N_c \text{ (二次方程)} \\ d & N_a \geq N_c \text{ (水平直线)} \end{cases}$$

式中, W 为地上部生物量, a 、 b 、 c 、 d 均为参数, N_a 为植株实测氮浓度值, N_c 即为临界氮浓度值。

本试验不同处理间差异显著, 且各取样时期数

据未呈现较好的分段函数特性, 因此采用第一种方法建模。

1.4.2 临界氮稀释曲线 根据临界氮浓度及相应的地上部生物量即可建立作物整个生育期的临界氮稀释曲线。

$$N_c = aW^{-b} \quad (a、b \text{ 为参数})$$

在作物生长过程中, 若植株氮含量在该曲线以下, 说明氮素供应不足, 作物生长受到限制; 若氮含量在曲线以上, 说明氮素过多, 容易造成浪费; 若氮含量刚好与曲线吻合, 则此时氮素供应量最适宜。

1.4.3 氮营养指数(NNI)

$$NNI = N_a/N_c$$

若 NNI 小于 1, 则氮素不足; 等于 1, 恰好合适; 大于 1, 则氮营养过盛。

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 进行标准化处理和作图, 利用 SPSS 软件统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥处理玉米地上部生物量的变化和 数据筛选与分组

由表 1 可以看出, 不同施氮处理、不同年份和取样时期, 玉米植株地上部生物量在 1.61~17.36 t hm⁻² 之间变化。同一取样时期随着施氮量的增加,

玉米植株地上部干物重呈显著增加趋势, 施氮效果显著, 但同时 N₁₈₀ 和 N₂₄₀ 处理之间大多没有显著差异, 说明过度施氮没有有效提高地上部生物量。

由于本研究玉米七叶展时期样品地上部生物量小于 1 t hm⁻², 故舍弃此期数据。参照 Justes 等^[8]于 1994 年提出的数据分组方法, 对其他时期不同氮肥处理玉米地上部生物量分别统计分析, 并根据 LSD 结果将数据分为限氮和非限氮两组, 即每个取样时期的最高生物量等级的为非限氮组(标记为字母 a 的数据点), 每个取样时期的最低生物量等级的为限氮组(标记为字母 b 的数据点), 与非限氮组和限氮组差异均不显著的数据(标记为字母 ab 的数据点, 即 2009 年度吐丝后 12 d 的 N₁₂₀ 处理、吐丝后 40 d 的 N₁₈₀ 处理、成熟期的 N₁₂₀ 处理和 2010 年度吐丝后 24 d 的 N₁₈₀ 处理的数据)予以舍弃^[18]。从分组结果看, 非限氮条件下的数据点几乎全部为 N₁₈₀ 和 N₂₄₀ 处理的取样值, 还包括了 2010 年 N₁₂₀ 处理吐丝后 12 d 的数据点; 相反, 表现为受氮素限制的数据点均来自于 N₀、N₆₀ 和 N₁₂₀ 处理的取样值。

2.2 不同氮肥处理玉米植株氮含量变化

玉米植株氮含量随地上部生物量的增加逐渐下降(图 1)。2009 年和 2010 年植株氮含量的变化范围分别为 8.8~22.1 g N kg⁻¹ 和 7.89~20.2 g N kg⁻¹。随着施氮量的增加, 玉米植株不同取样时期的氮含量均呈增加趋势。

表 1 不同氮肥处理玉米不同生育时期的地上部生物量
Table 1 Maize shoot biomass at different stages under different N-fertilizer levels

氮肥处理 N-fertilizer treatment	十三叶展 13-leaf stage	吐丝期 Silking stage	吐丝后 12 d 12 d after silking	吐丝后 24 d 24 d after silking	吐丝后 40 d 40 d after silking	成熟期 Maturity stage
2009						
N ₀	1.61±0.06 e	3.84±0.07 d	6.10±0.23 c	7.58±0.33 d	10.01±0.53 d	12.70±0.22 c
N ₆₀	1.95±0.01 d	4.27±0.02 c	7.25±0.26 b	8.78±0.27 c	12.09±0.45 c	13.96±0.07 bc
N ₁₂₀	2.46±0.09 c	5.03±0.18 b	7.57±0.54 ab	9.72±0.09 b	13.43±0.43 bc	15.26±0.56 ab
N ₁₈₀	2.79±0.06 b	5.14±0.01 b	8.51±0.05 a	11.73±0.07 a	14.59±0.57 ab	16.57±0.82 a
N ₂₄₀	3.33±0.10 a	5.48±0.08 a	8.32±0.16 a	11.37±0.34 a	15.06±0.24 a	17.01±0.74 a
2010						
N ₀	2.29±0.10 b	5.16±0.08 c	6.54±0.11 c	8.90±0.18 d	10.32±0.11 d	11.80±0.12 d
N ₆₀	3.00±0.11 b	5.71±0.13 b	7.76±0.32 b	10.44±0.16 c	12.62±0.07 c	14.02±0.07 c
N ₁₂₀	3.46±0.12 b	5.94±0.08 b	8.64±0.16 a	11.59±0.18 b	14.82±0.18 b	16.32±0.18 b
N ₁₈₀	3.80±0.09 a	6.30±0.05 a	8.71±0.37 a	12.12±0.21 ab	16.01±0.14 a	17.30±0.13 a
N ₂₄₀	4.06±0.07 a	6.38±0.02 a	9.12±0.22 a	12.29±0.27 a	15.79±0.19 a	17.36±0.31 a

同一列中对于同一年份, 不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Within a column for the same year, means followed by the same letter are not significantly different at $P < 0.05$.

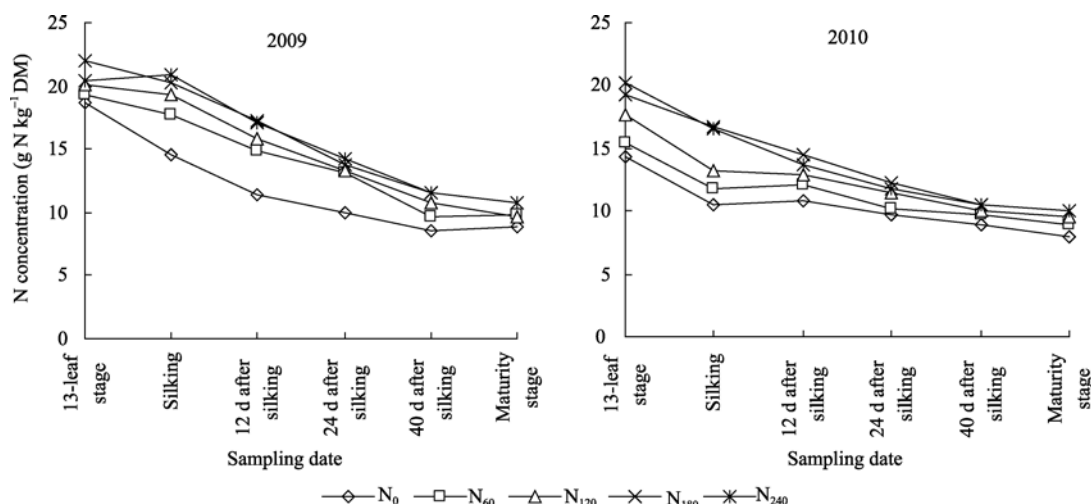


图 1 不同氮肥处理玉米不同生育时期的植株氮含量变化

Fig. 1 Changes in plant N concentration at different stages under different N-fertilizer levels

2.3 夏玉米临界氮稀释曲线

对本研究 2 组数据的地上部生物量 and 对应氮浓度值分别进行回归曲线拟合, 找出每次取样日的临界氮浓度。根据临界氮浓度及相应的地上部生物量, 建立玉米整个生育期的临界氮稀释曲线和幂函数方程(图 2)。从拟合的幂函数方程可看出, 方程的决定系数为 0.8187, 拟合度达到极显著水平, 说明可以用来表征玉米植株氮含量与地上部生物量之间的关系。从与已有研究的比较看, 参数 a 、 b 与 Plènet 和 Lemaire 在法国所建方程参数($a = 34.0$, $b = -0.37$)^[15]、Herrmann 和 Taube 在德国所建方程参数($a = 34.12$, $b = -0.391$)^[16]相似, 因此我们认为本研究建立的临界氮稀释曲线模型适用于华北地区, 可以作为华北地区夏玉米氮营养诊断曲线。根据该模型, 各取样日的玉米临界氮浓度 2 年平均分别为 $20.24 \text{ g N kg}^{-1}$ (十三叶展)、 $16.55 \text{ g N kg}^{-1}$ (吐丝期)、 $14.26 \text{ g N kg}^{-1}$

(吐丝后 12 d)、 $12.54 \text{ g N kg}^{-1}$ (吐丝后 24 d)、 $11.17 \text{ g N kg}^{-1}$ (吐丝后 40 d) 和 $10.77 \text{ g N kg}^{-1}$ (成熟期)。

2.4 夏玉米氮营养指数(NNI)

根据临界氮稀释曲线可以把植株体内氮素水平分为 3 种情况, 当数据点在该曲线以下时说明氮素供应不足, 限制了作物生长; 在曲线之上则说明氮素供应过量; 在曲线附近或曲线上时说明氮素供应刚好能够满足植株生长需求。作物氮营养状况也可基于临界氮浓度曲线, 利用 NNI 直观地判断。图 3 表明, 2 年的 NNI 在 0.58~1.21 之间变动。当 NNI 大于或等于 1 时, 说明玉米生长环境不受氮素限制; 当 NNI 小于 1 时则说明玉米生长受到了氮素不足的制约。在施氮量为 $180 \sim 240 \text{ kg hm}^{-2}$ 的情况下, 玉米生长基本处于非限氮条件, 但生育后期稍显不足; 施氮量在 120 kg hm^{-2} 及其以下时, 玉米生长表现出明显的氮素供应不足。从 2 年的结果比较看, 2009 年 N_{240} 、 N_{180} 和 N_{120} 处理吐丝期和灌浆期表现出明显的氮素过丰现象, 这可能与土壤原始肥力较高有关。

2.5 氮营养指数与相对氮累积量、相对地上部生物量和相对产量之间的关系

为了评价 NNI 在预测植株氮素盈亏上的可行性, 分别研究了相对氮累积量(RN_{upt})、相对地上部生物量(RDW)、相对产量(RY)与 NNI 之间的关系(图 4~图 6)。相对氮累积量和相对地上部生物量均表现随 NNI 的增加而增加, RN_{upt} -NNI、RDW-NNI 均表现线性相关关系, 除吐丝期的相对地上部生物量与 NNI

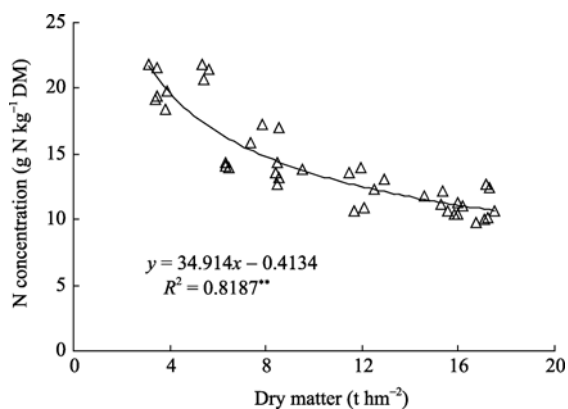


图 2 夏玉米植株临界氮浓度和地上部生物量的关系

Fig. 2 Relationship between plant critical N concentration and dry matter in summer maize

方程决定系数(R^2)较小, 拟合度不显著外, 其他均达到极显著水平。而就 NNI 与相对产量之间的关系看, 二者呈二次曲线关系, 即相对产量先随 NNI 的增加而增加, 达到最高值后不再随之增加, 方程决

定系数达到极显著水平。本研究条件下, NNI 为 0.99 时, RY 获得最大值, 为 0.93。可见, NNI 和相对氮累积量、相对地上部生物量、相对产量之间的关系密切, 利用 NNI 评价植株氮营养状况的方法是可靠的。

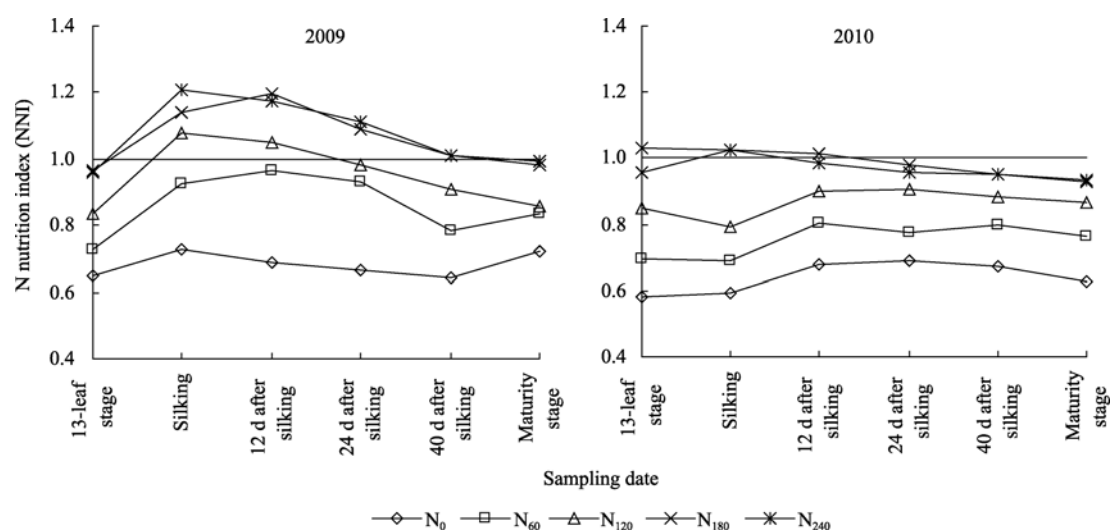


图 3 不同氮肥处理玉米不同生育时期的植株氮营养指数(NNI)
Fig. 3 N nutrition index (NNI) at different stages under different N-fertilizer levels

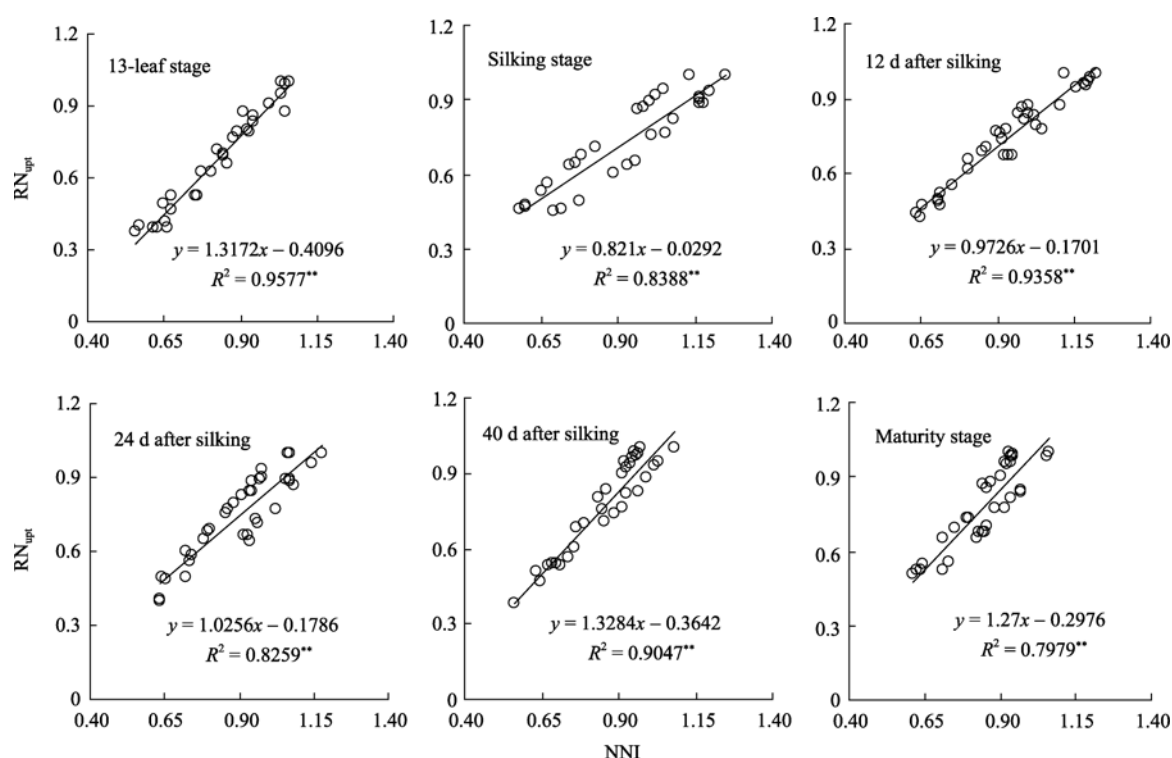


图 4 夏玉米氮营养指数(NNI)与相对吸氮量(RN_{upt})的关系
Fig. 4 Relationship between N nutrition index (NNI) and relative N uptake amount (RN_{upt}) in summer maize

3 讨论

目前, 生产上盲目过量施用氮肥的现象非常普

遍, 氮肥利用效率低, 而明确作物产量形成过程中不同生育阶段的临界氮浓度是科学诊断植株氮营养状况, 实现作物各生育阶段氮肥合理施用的基础。

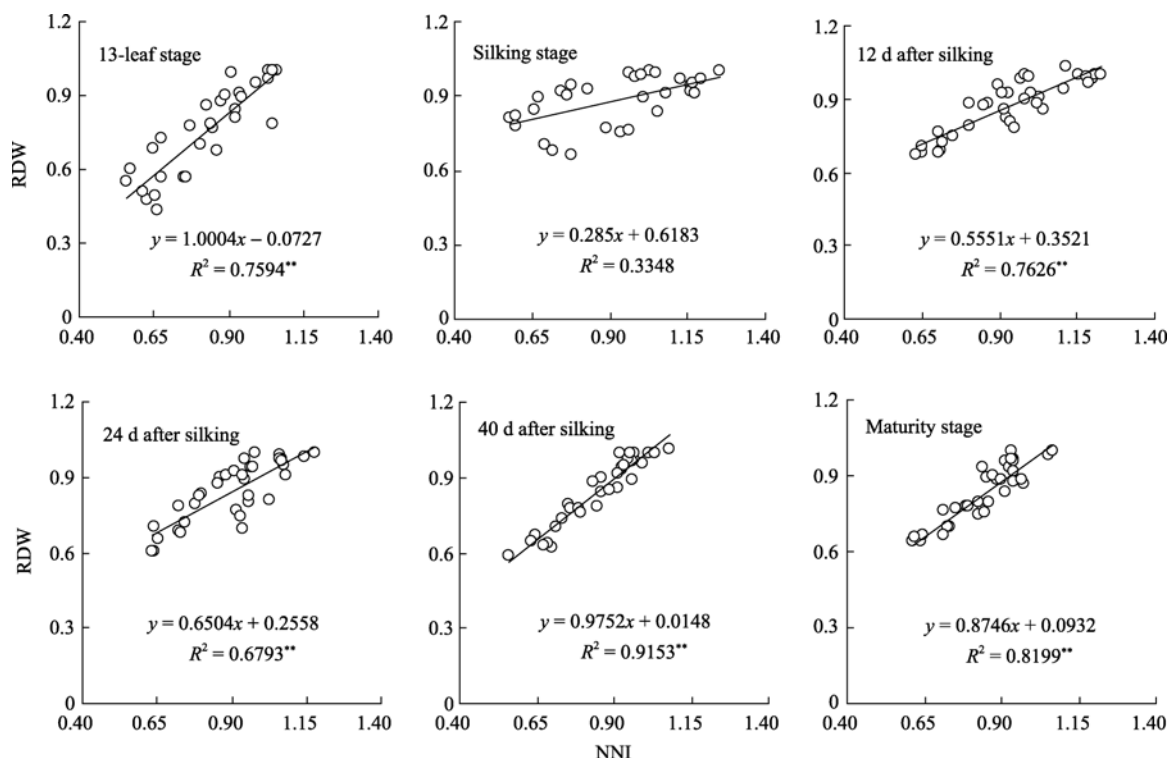


图 5 夏玉米氮营养指数(NNI)与相对地上部生物量(RDW)的关系

Fig. 5 Relationship between N nutrition index (NNI) and relative dry matter (RDW) in summer maize

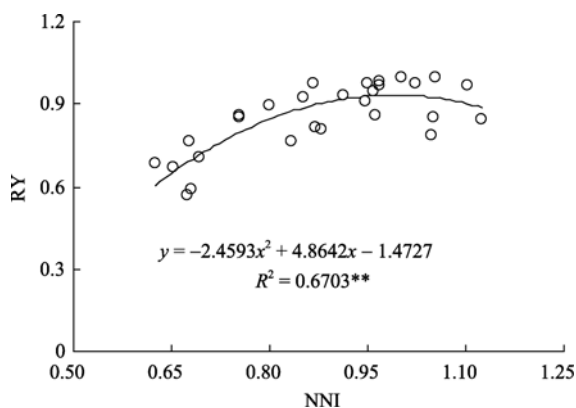


图 6 夏玉米氮营养指数(NNI)与相对产量(RY)的关系

Fig. 6 Relationship between N nutrition index (NNI) and relative yield (RY) in summer maize

本研究利用 2 年 5 个氮水平的数据, 建立了华北地区夏玉米临界氮稀释曲线模型($N_c = 34.914W^{-0.4134}$), 并对 NNI 及其与相对氮积累量、相对地上部生物量和相对产量之间的关系进行了研究。从夏玉米临界氮稀释曲线模型看, 玉米植株临界氮含量与地上部生物量之间表现为幂函数关系, 方程的决定系数为 0.8187, 拟合度达到极显著水平, 与 Plènet 和 Lemaire^[15]在法国所建方程($N_c = 34.0W^{-0.37}$)、Herrmann 和 Taube^[16]在德国建立的方程($N_c = 34.12W^{-0.391}$)相似。因此, 我们认为临界氮稀释曲线

适用于华北地区, 可作为华北地区夏玉米氮营养诊断曲线。而为了比较玉米临界氮稀释曲线的通用性, 我们将限氮和非限氮条件下的各取样时期的干物重和实测氮浓度取平均后与 3 个模型进行对比(图 7), 发现非限氮数据点(21 个)均处在 3 条曲线以上或附近, 限氮数据点(51 个)多处处在曲线以下, 方程表现出较好的适用性。同时, 模型在不同气候、土壤、品种等方面应用的有效性, 也分别在冬小麦^[8]、冬油菜^[9]等作物和玉米^[15-16,18]上得到了一些验证。但是, 也有研究认为模型不能适用于有机肥处理^[16], 模型的参数可能因试验地区或作物的不同出现差异^[7-8,12], 而从本研究及在法国、德国所建玉米模型看, 尽管 3 个方程的参数相近, 但仍存在一定差异, 即获得相同生物量的临界氮浓度有差异, 并且随着生物量的增加差异增大(图 7), 因此, 关于模型的通用性, 可能尚需要进一步深入细致的研究。而从 NNI 的研究结果看, NNI 与相对氮积累量、相对地上部生物量和相对产量之间显著的相关性, 说明利用 NNI 评价植株氮营养状况的方法是可靠的。本研究条件下夏玉米施肥可以 180 kg hm^{-2} 为标准, 并适当降低生育中期的氮供应量, 增加中后期施氮能够有效保证氮素供应。但是, 本研究采用的是定位研究方法, 试验也仅进行了 2 年, 且 NNI 在第 2 年的高氮处理下有较大

幅度的降低(图 3), 同时冬小麦季采用的是节水省肥高产栽培模式^[20], 但未按该模式要求在冬小麦季施入有机肥, 因此, 尚需进一步研究该地区夏玉米季最佳氮肥用量。

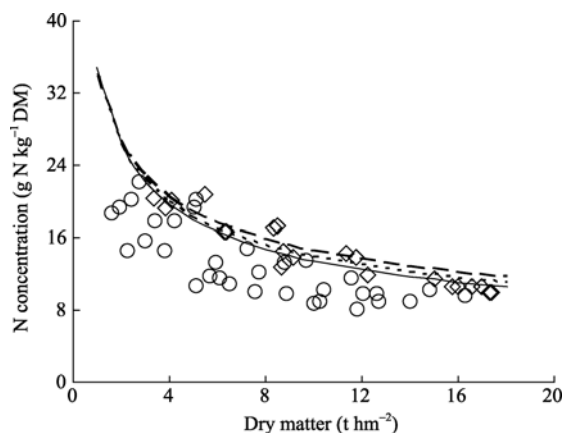


图 7 本研究限氮和非限氮条件下的生物量与 3 个临界氮稀释曲线模型之间的关系

Fig. 7 Relationships between the three models of critical nitrogen dilution curve and the data set of both N limited and non-limited in this study

本研究模型: $N_c = 34.914W^{-0.4134}$, 实线; Plènet 和 Lemaire 模型: $N_c = 34.0W^{-0.37}$, 圆点线; Herrmann 和 Taube 模型: $N_c = 34.1W^{-0.39}$, 破折线。空心菱形为非限氮数据点, 空心圆点为限氮数据点。Model established in the study: $N_c = 34.914W^{-0.4134}$, the solid line; model of Plènet and Lemaire, $N_c = 34.0W^{-0.37}$, the dot line; and model of Herrmann and Taube, $N_c = 34.1W^{-0.39}$, the dash line. Hollow diamond denote the data set of N non-limited, hollow circle denote the data set of N limited.

4 结论

玉米临界氮稀释曲线能够作为华北地区夏玉米植株地上部生物量和氮浓度之间的关系模型, 利用该模型可以预测临界氮含量。NNI 能直观反映作物不同生育时期的氮素含量盈亏状况, 与相对氮累积量、相对地上部生物量和相对产量等指标间存在极显著相关性, 生产上利用 NNI 指导施肥具有现实意义。

References

- [1] Chen G-P(陈国平). Mineral nutrition and fertilization in maize (review). *J Maize Sci* (玉米科学), 1992, 1(1): 59–66 (in Chinese)
- [2] Wang Q-Y(王群瑛), Hu C-H(胡昌浩), Wang Z-L(王振林), Yan M-J(晏明君), Zhai N-C(翟乃翠). Effects of nitrogen, phosphorus and potassium deficiencies on the plant characters, leaf structure and certain physiological properties in maize. *Acta Agric Boreali-Sin* (华北农学报), 1992, 7(1): 92–99 (in Chinese with English abstract)
- [3] Li C-H(李潮海), Liu K(刘奎), Zhou S-M(周苏玫), Luan L-M(栾丽敏). Response of photosynthesis to eco-physiological factors of summer maize on different fertilizer amounts. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2002, 28(2): 265–269 (in Chinese with English abstract)
- [4] Ye J(叶君), Gao J-L(高聚林), Wang Z-G(王志刚), Yu X-F(于晓芳), Sun J-Y(孙继颖), Li L-J(李丽君), Gao Y-B(高英波), Wang H-Y(王海燕), Jia N(贾宁), Gao X(高鑫), Cui C(崔超). Effects of nitrogen on leaf photosynthesis and grain yield of super high-yield spring maize during the flowering and milking stage. *J Maize Sci* (玉米科学), 2011, 19(6): 74–77 (in Chinese with English abstract)
- [5] He P(何萍), Jin J-Y(金继运), Lin B(林葆). Study progress on maize high yield fertilization and nutrition physiological. *J Maize Sci* (玉米科学), 1998, 6(2): 72–76 (in Chinese)
- [6] Ulrich A. Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants. *Annu Rev Plant Physiol*, 1992, 3: 207–228
- [7] Greenwood D J, Lemaire G, Grosse G, Cruz P, Draycott A, Neeteson J. Decline in percentage N of C₃ and C₄ crops with increasing plant mass. *Ann Bot*, 1990, 66: 425–436
- [8] Justes E, Mary B, Meynard J M, Machet J M, Thelier-Huche L. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Ann Bot*, 1994, 74: 397–407
- [9] Colnenne C, Meynard J M, Reau R, Justes E, Merrien A. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. *Ann Bot*, 1998, 81: 311–317
- [10] Sheehy J E, Dionora M J A, Mitchell P L, Peng S, Cassman K G, Lemaire G, William R L. Critical nitrogen concentrations: implications for high-yielding rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in the tropics. *Field Crops Res*, 1998, 59: 31–41
- [11] van Oosterom E J, Carberry P S, Muchow R C. Critical and minimum N contents for development and growth of grain sorghum. *Field Crops Res*, 2001, 70: 55–73
- [12] Bélanger G, Walsh J R, Richards J E, Milburn P H, Ziadi N. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for potato in eastern Canada. *Am J Potato Res*, 2001, 78: 355–364
- [13] Xue X-P(薛晓萍), Zhou Z-G(周治国), Zhang L-J(张丽娟), Wang Y-L(王以琳), Guo W-Q(郭文琦), Chen B-L(陈兵林). Development and application of critical nitrogen concentration Dilution Model for cotton after flowering. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2006, 26(6): 1781–1791 (in Chinese with English abstract)
- [14] Xue X-P(薛晓萍), Chen B-L(陈兵林), Guo W-Q(郭文琦), Zhou Z-G(周治国), Zhang L-J(张丽娟), Wang Y-L(王以琳). Dynamic

- quantitative model of critical nitrogen demand of cotton. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2006, 17(12): 2363–2370 (in Chinese with English abstract)
- [15] Plénet D, Lemaire G. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops, determination of critical N concentration. *Plant Soil*, 2000, 216: 65–82
- [16] Herrmann A, Taube F. The range of the critical N dilution curve for maize can be extended until silage maturity. *Agron J*, 2004, 96: 1131–1138
- [17] Lemaire G, Oosterom E V, Sheehy J, Jeuffroy M H, Massignam A, Rossato L. Is crop N demand more closely related to dry matter accumulation or leaf area expansion during vegetative growth? *Field Crops Res*, 2007, 100: 91–106
- [18] Ziadi N, Brassard M, Bélanger G, Cambouris A N, Tremblay N, Nolin M C, Claessens A, Parent L E. Critical N curve and N nutrition index for corn in Eastern Canada. *Agron J*, 2008, 100: 271–276
- [19] 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. *Eur J Agron*, 2008, 28: 614–624
- [20] Wang Z-M(王志敏), Wang P(王璞), Li X-H(李绪厚), Li J-M(李建民), Lu L-Q(鲁来清). Principle and technology of water-saving, fertilizer-saving, high-yielding and simple cultivation in winter wheat. *Rev China Agric Sci Tech* (中国农业科技导报), 2006, 8(5): 38–44 (in Chinese with English abstract)