

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.03007

不同降雨状况下渭北旱地春玉米临界氮稀释曲线与氮素营养诊断

刘朋召 师祖姣 宁芳 王瑞 王小利 李军*

西北农林科技大学农学院 / 农业部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室, 陕西杨凌 712100

摘要: 过量施氮、降雨变率大和水氮耦合差是渭北旱地春玉米生产中氮肥高效利用的主要难题。构建渭北旱地不同降雨状况下春玉米临界氮稀释曲线, 分析采用氮营养指数 NNI 诊断和评价旱地玉米氮素营养状况的可行性, 为实现旱地玉米因雨合理施氮提供理论依据。以郑单 958 和陕单 8806 为试验材料, 设置 5 个施氮量处理, 2016—2017 年 5 个施氮量处理分别为 0、75、150、270 和 360 kg hm⁻², 2018—2019 年施氮量调整为 0、90、180、270 和 360 kg hm⁻², 文中依次用 N0、N1、N2、N3、N4 表示。其中 2016 年和 2018 年降水状况表现为穗期多雨, 花粒期干旱; 2017 年和 2019 年降水状况表现为穗期干旱, 花粒期多雨, 利用 4 年田间定位施氮试验数据构建并验证 2 种降雨状况下旱地春玉米临界氮稀释曲线模型。结果表明: (1)增施氮肥显著提高了旱地春玉米地上部生物量和植株含氮量, 不同施氮量处理间差异显著。2 种降雨状况下春玉米临界氮浓度和地上部生物量均符合幂指数关系, 但模型参数之间存在差异(a. 穗期多雨: $N_c=35.98DM^{-0.35}$; b. 穗期干旱: $N_c=35.04DM^{-0.23}$)。模型拟合的植株氮浓度和实际氮浓度线性相关, 穗期多雨年 RMSE 和 n -RMSE 分别为 1.03、5.75%, 穗期干旱年分别为 1.53、6.78%, 模型均具有较好稳定性。(2)在试验施氮量范围内, 不同生育时期 NNI 随氮肥用量增加而增大, 不同降雨状况下最佳施氮量存在差异。渭北旱地玉米最适施氮方案为基施氮肥 150~180 kg hm⁻², 穗期多雨年追施氮肥 45~75 kg hm⁻²。(3)氮营养指数 NNI 与相对吸氮量 (RN_{upt})、相对地上部生物量 (RDW) 和相对产量 (RY) 均极显著相关, 穗期多雨年 NNI 为 1.02 时, RY 获得最大值, 为 0.95; 穗期干旱年 NNI 为 1.08 时, RY 获得最大值, 为 0.92。本研究建立的旱地玉米临界氮稀释曲线和氮营养指数, 能够精准预测 2 种降雨状况下旱地春玉米拔节期至完熟期的氮素营养状况, 对玉米生育季氮诊断及指导精确施氮具有重要意义。

关键词: 降雨分布; 渭北旱地; 春玉米; 临界氮浓度; 氮营养指数

Critical nitrogen dilution curves and nitrogen nutrition diagnosis of spring maize under different precipitation patterns in Weibei dryland

LIU Peng-Zhao, SHI Zu-Jiao, NING Fang, WANG Rui, WANG Xiao-Li, and LI Jun*

College of Agronomy, Northwest A&F University / Key Laboratory of Crop Physiobiology and Tillage Science in Northwestern Loess Plateau, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, Shaanxi, China

Abstract: The excessive nitrogen (N) applications, large rainfall variations and poor water-nitrogen couplings are main problems to efficient nitrogen fertilizer uses in spring maize production of Weibei dryland. Critical nitrogen dilution curves under different rainfall scenarios in Weibei dryland were constructed in this study to analyze the feasibilities of diagnosing and evaluating nitrogen nutritional conditions in terms of nitrogen nutrition index (NNI), which would provide a theoretical basis for reasonable nitrogen fertilizations application of dryland maize in response to different rainfalls. The experiment design using Zhengdan 958

本研究由国家科技支撑计划项目(2015BAD22B02), 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA102902)和国家自然科学基金项目(31801300)资助。

This study was supported by the National Key Technology Support Program of China (2015BAD22B02), the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2013AA102902), and the National Natural Science Foundation of China (31801300).

* 通信作者(Corresponding author): 李军, E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: liupz@foxmail.com

Received (收稿日期): 2020-01-31; Accepted (接受日期): 2020-04-15; Published online (网络出版日期): 2020-05-08.

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200507.1615.008.html>

(ZD958) and Shaandan 8806 (SD8806) as tested materials was five treatments level, N applied at 0(N0), 75(N1), 150(N2), 270(N3), and 360(N4) kg hm⁻² in 2016 and 2017, and at 0(N0), 90(N0), 180(N2), 270(N3), and 360(N4) kg hm⁻² in 2018 and 2019, respectively. It was rainy at the ear stage and dry at the grain stage in 2016 and 2018, whereas dry at the ear stage and rainy at the grain stage in 2017 and 2019. Critical nitrogen dilution curve models for spring maize with two precipitation patterns were constructed and verified using the data collected in the four-year position nitrogen fertilization experiment. The results showed that: (1) increased nitrogen fertilizer application significantly increased aboveground biomass and plant N concentrations, and there were significantly different among different treatments. Both critical nitrogen concentrations (N_c) and aboveground biomass conformed the exponential relations with the two precipitation patterns, but there were differences between the parameters of the models for these relations (a. Rainy at the ear stage: $N_c = 35.98DM^{-0.35}$; b. Dry at the ear stage: $N_c = 35.04DM^{-0.23}$). The relatively stable model had a linear correlation between the fitted and actual plant N concentrations, which shown that the RMSE and n -RMSE were 1.03 and 5.75% at the ear stage over the rainy years and 1.53 and 6.78% at the ear stage in the dry years, respectively. (2) at the different growth stages, NNI were increased with the increased application, and there were differences in the optimal nitrogen application under different precipitation conditions. The optimum N rate in the form of basal fertilizers was 150–180 kg hm⁻², and in the form of top dressing fertilizers was 45–75 kg hm⁻² at the ear stage in the rainy years. The nitrogen nutrition index (NNI) was significantly correlated with relative nitrogen uptake (RN_{upt}), as were relative aboveground biomass (RDW) and relative yield (RY). When the NNI was 1.02 at the ear stage in the rainy years, the maximum RY was 0.95; and when the NNI was 1.08 at the ear stage in the dry years, the maximum RY was 0.92. The critical nitrogen dilution curve model and nitrogen nutrition index model constructed in this study were able to accurately predict nitrogen nutrition conditions from jointing stage to maturity stage under the two precipitation patterns of spring maize. They would provide an important guidance for nitrogen diagnosis and fertilization application in maize growing stage.

Keywords: precipitation pattern; Weibei dryland; spring maize; critical nitrogen dilution curve; nitrogen nutrition index

玉米生长过程中对氮素需求量高, 关于玉米植株养分累积分配、生长与产量、氮肥优化管理等方面已开展大量研究^[1]。农民基于追求作物高产目的, 过量施氮现象非常普遍, 作物生产过程中无法满足氮素供需之间的同步性^[2], 导致氮素利用效率偏低, 同时造成温室气体排放加剧和大气污染、土壤酸化及地下水污染。因此, 针对作物不同生育时期氮素营养实际状况优化供氮量, 对于提高氮素利用效率和环境保护具有重要意义。前人围绕植株体氮素精确诊断方面做了大量研究, 如根区养分检测、叶片叶绿素测定以及应用 RS 技术^[3-5]等。临界氮浓度被定义为作物一定生长期最大生物量时的最小氮浓度, 能较好反映作物高产时的最佳需氮量, 是作物氮素诊断的基本方法之一, 临界氮稀释曲线及基于此的氮营养指数可以动态描述作物氮素营养状况的变化, 是实现合理施氮的氮素营养诊断关键技术^[6]。国内外学者先后建立棉花^[7]、小麦^[8]、冬油菜^[9]、水稻^[10]、大蒜^[11]、玉米^[12-19]等作物的临界氮浓度稀释模型, 发现不同作物品种及生态气候区域均会影响模型参数变化。国内有关玉米临界氮浓度的相关研究主要集中于关中^[12]、宁夏^[13]、豫中^[14]和华北地区^[15-16], 且均为基于无水分胁迫条件下的玉米氮稀释曲线。渭北旱塬属于典型雨养农业区, 水资源缺乏, 受季节性降雨分配不均、年际间波动大等因素影响, 旱地春玉米常遭受不同程度干旱胁迫, 导致

产量低而不稳。水分亏缺会影响春玉米生长发育和干物质累积, 同步影响植株对氮素吸收利用的能力, 不利于农业可持续性发展。因此明确旱地春玉米不同生育阶段临界氮浓度, 对于科学诊断植株氮营养状况, 指导渭北旱地春玉米种植区合理施氮具有重要意义。本研究通过 4 年田间定位施氮试验, 建立渭北旱塬不同降雨分布状况下旱地春玉米临界氮素稀释曲线和氮营养指数模型, 以期为渭北旱地春玉米氮营养诊断和生育季精准施氮提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 田间试验方法

1.1.1 试验地概况 本试验于 2016 年 4 月至 2019 年 9 月在陕西省合阳县甘井镇西北农林科技大学旱农试验站(35°19'54.45"N, 110°05'58.35"E)进行。该地区海拔 877 m, 属典型黄土高原沟壑区, 暖温带半干旱型大陆性季风气候, 年均降雨量为 536.6 mm, 60%以上集中在 7 月至 9 月。供试地块土壤为黑垆土, 试验地耕层 0~20 cm 土壤有机质含量 11.38 g kg⁻¹, 全氮含量 0.98 g kg⁻¹, 全磷含量 0.79 g kg⁻¹, 全钾含量 11.15 g kg⁻¹, 速效磷含量 28.39 mg kg⁻¹, 速效钾含量 277.36 mg kg⁻¹。

1.1.2 试验年份降雨分布状况 2016—2019 年试验期间春玉米全生育期降雨量分别为 357.5、362.6、224.9、320.1 mm, 不同生育时期降雨量如图 1 所示

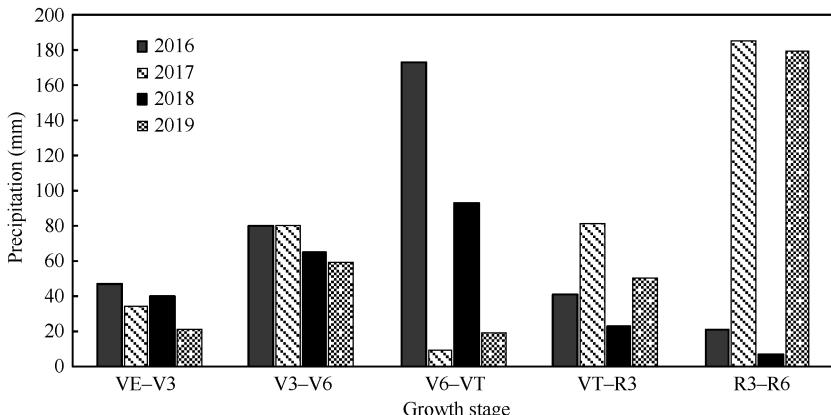


图1 2016—2019年春玉米各生育阶段降雨量分布

Fig. 1 Precipitation distributions at the different growth stages from 2016 to 2019

VE-V3: 出苗期—三叶期; V3-V6: 三叶期—拔节期; V6-VT: 拔节期—抽雄期; VT-R3: 抽雄期—乳熟期; R3-R6: 乳熟期—完熟期。

VE-V3: from emergence stage to third leaf stage; V3-V6: from third leaf stage to jointing stage; V6-VT: from jointing stage to tasseling stage; VT-R3: from tasseling stage to milk stage; R3-R6: from milk stage to maturity stage.

(VE-V3、V3-V6、V6-VT、VT-R3、R3-R6 分别代表出苗期—三叶期、三叶期—拔节期、拔节期—抽雄期、抽雄期—乳熟期、乳熟期—完熟期)。根据 4 年试验期间春玉米穗期(拔节期至抽雄期)和花粒期(抽雄期到完熟期)降雨分布状况分为两种干旱年型: 2016 年和 2018 年为“穗期多雨, 花粒期干旱”型; 2017 年和 2019 年为“穗期干旱, 花粒期多雨”型, 文中分别用“a. 穗期多雨”和“b. 穗期干旱”来表示。

1.1.3 试验设计 采取施氮量与品种二因素裂区设计, 施氮量为主处理, 设 5 个施氮量水平, 品种为副处理, 设 2 个品种类型, 共组成 10 个处理, 小区面积 43.2 m^2 ($8.0 \text{ m} \times 5.4 \text{ m}$), 重复 3 次。供试玉米品种为郑单 958 (ZD958) 和陕单 8806 (SD8806)。设置 5 个施氮量处理, 分别以 N0、N1、N2、N3、N4 表示。2016—2017 年 5 个施氮量处理为纯氮 0、75、150、270 和 360 kg hm^{-2} , 2018—2019 年施氮量处理调整为 0、90、180、270 和 360 kg hm^{-2} 。氮肥全部基施, 统一配施 $\text{P}_2\text{O}_5 120 \text{ kg hm}^{-2}$, $\text{K}_2\text{O} 45 \text{ kg hm}^{-2}$, 氮、磷、钾肥分别为尿素(含 N 46.4%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)、硫酸钾(含 K_2O 50%)。每年均于 4 月下旬播种, 9 月中下旬收获。种植密度为 $67,500 \text{株 hm}^{-2}$, 人工播种控制行距 50 cm, 株距 29.6 cm。全生育期无灌溉, 其他管理措施与当地农户保持一致。

1.1.4 测定项目与方法 1)植株样品采集与测定: 分别于玉米拔节期(V6)、抽雄期(VT)、乳熟期(R3)和完熟期(R6)取样, 每个小区选取长势具有代表性的植株 2 株。将植株去根, 按器官分开在 105 下杀青 30 min, 然后 85 烘干至恒重, 测定其干物质重后, 粉碎过 60 目筛, 用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮法, 凯氏定

氮仪测定植株全氮。2)产量测定: 玉米收获期, 每个小区选取 4.5 m^2 , 统计穗数, 然后从中选取能代表该小区的 10 株作为代表样带回实验室考种, 调查穗部性状, 脱粒后风干, 称取百粒重计算籽粒产量。

1.2 模型建立方法

1.2.1 临界氮浓度稀释曲线模型构建 临界氮浓度是指在一定作物生长期获得最大干物质量所需的小氮素浓度。建立临界氮浓度稀释曲线, 先需要确定关键数据点, 参照 Justes 等^[20]构建临界氮浓度稀释曲线步骤如下:

1) 对比分析不同氮水平下每个测定生育时期的地上部生物量及相对应的氮浓度值, 根据方差分析($P < 0.05$)将作物生长受氮素的影响分为限制和不限制 2 类;

2) 对于施氮量不能满足作物生长需求的观察数据, 将地上部生物量(DM)与植株氮含量(g kg^{-1})进行线性曲线拟合;

3) 对于生长状况不受氮素影响的施氮水平, 则地上部生物量的平均值代表地上部生物量的最大值。

4) 每个作物采样时期的理论临界氮浓度由上述线性曲线与以最大地上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:

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

式中, N_c 为临界氮含量, g kg^{-1} ; 参数 a 为地上部生物量为 1 t hm^{-2} 时植株的临界氮浓度^[21]; DM 为春玉米地上部生物量的最大值, t hm^{-2} ; 参数 b 为决定临界氮浓度稀释曲线斜率的统计学参数^[20]。

1.2.2 临界氮稀释曲线模型的检验 模型验证采用国际通用的回归估计标准误差均方根误差 RMSE

和标准化均方根误差 n -RMSE^[23-24] 来检测模型的拟合度。RMSE 和 n -RMSE 的计算公式分别为:

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

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

式中: S_i 、 M_i 分别为临界氮测定值和模拟值; n 为样本量; S 为实测数据的平均值。参照 Jamieson 等^[25] 提出的标准来衡量模型稳定性: n -RMSE<10%, 模型稳定性极好; 10%< n -RMSE<20%, 模型稳定性较好; 20%< n -RMSE<30%, 模型稳定性一般; n -RMSE>30%, 模型稳定性较差。

1.2.3 氮素营养指数(NNI)模型的构建 为进一步明确作物的氮素营养状况, Lemaire 等^[21] 提出氮素营养指数(nitrogen nutrition index, NNI)的概念, 可用公式(4)来表示:

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

式中, NNI 为氮素营养指数, N_a 为氮浓度实测值, g kg^{-1} ; N_c 为临界氮浓度值, g kg^{-1} 。NNI 可直观反映作物体内氮素的营养状况, NNI=1, 表明作物氮素营养状况适宜; NNI>1, 表明作物氮素营养过剩; NNI<1, 表现为氮素营养缺失。

1.2.4 相对氮吸收量、相对地上部生物量和相对产量计算 相对吸氮量(relative nitrogen uptake, RN_{upt}) = 吸氮量/同一生育时期同一干旱年型吸氮量最大值; 相对地上部生物量(relative dry biomass, RDW) = 地上部生物量/同一生育时期同一干旱年型地上部生物量的最大值; 相对产量(relative yield, RY) = 实际产量/同一干旱年型产量的最大值。

1.3 数据处理与分析

根据 4 年玉米试验年份降水季节分布状况, 2016 年和 2018 年为“穗期多雨, 花粒期干旱”型; 2017 年和 2019 年为“穗期干旱, 花粒期多雨”型。本文利用 2016 年和 2017 年试验数据分别建立 2 种降雨状况下旱地春玉米临界氮浓度稀释曲线模型, 利用 2018 年和 2019 年独立试验数据分别对 2016 年和 2017 年构建的模型进行验证。将 2 个玉米品种数据合并处理, 每个模型筛选出 8 个临界数据点, 每个模型建立和模型验证的样本数 $n=8$ 。同时, 分别选取 2016 年和 2017 年的施氮量最高(N4 处理)的数据建立最大氮浓度稀释曲线(N_{\max}), 选取 2016 年和 2017 年无氮肥投入(N0 处理)的数据建立最小氮浓度稀释曲线(N_{\min})。

试验数据和图表采用 Microsoft Excel 2016 和

Origin 2015 软件处理, 使用 SPSS 19.0 软件进行统计分析, 多重比较采用 Duncan's 法, 差异显著性水平设为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同施氮量处理对旱地春玉米干物质积累和产量的影响

以郑单 958 为例, 由表 1 可知, 适量施肥可以显著提高春玉米籽粒产量, 随着氮肥用量增加, 不同年份下春玉米籽粒产量均表现为先增加后降低的趋势。同一生育时期随氮素水平提高, 干物质量呈逐渐增加趋势, 施氮效果显著, 但同一取样时期 N270 和 N360 处理之间地上部干物质积累量基本没有显著差异, 说明施氮过量并不能提高地上部干物质积累量。雨养农业区生育期内降雨对作物地上部生物量和产量影响显著, 由于降雨造成不同年际间玉米生物量和产量变化较大。以 2018 年和 2019 年为例, 2018 年属于穗期多雨年, 地上部生物量和籽粒产量变化范围分别 2.23~23.14 t hm⁻² 和 5.67~10.26 t hm⁻², 最高产量施氮量为 270 kg hm⁻², 且施氮 270 kg hm⁻² 处理生物量显著高于 180 kg hm⁻²; 2019 年属于穗期干旱年, 地上部生物量和籽粒产量变化范围分别为 2.01~14.07 t hm⁻² 和 3.21~5.05 t hm⁻², 最高产量施氮量为 180 kg hm⁻², 且施氮 180 kg hm⁻² 和 270 kg hm⁻² 生物量无显著差异。可以看出不同干旱年型中玉米地上部生物量和籽粒产量对不同施氮量处理的响应程度差异明显, 在相同施氮量处理下, 穗期干旱年地上部生物量和籽粒产量分别仅为穗期多雨年的 60.6% 和 51.4%。

2.2 不同降雨状况下旱地春玉米植株氮浓度动态变化

以郑单 958 品种为例, 利用 2016—2019 年田间数据, 分析 2 种降雨状况下旱地春玉米植株氮浓度动态变化。玉米植株氮含量随生育时期推进逐渐下降(图 2)。2 种降雨状况下植株氮含量变化范围分别为 7.74~26.45 g kg⁻¹ 和 11.43~26.65 g kg⁻¹。不同干旱年型间植株氮浓度变化趋势不一致: 穗期多雨年植株长势较好, 抽雄吐丝期降雨量较多, 籽粒灌浆充足, 叶片和茎秆中氮素及时向籽粒转运; 穗期干旱年植株拔节至抽雄期受到水分胁迫, 影响植株授粉、受精, 籽粒灌浆受阻, 植株氮素下降速率缓慢, 后期雨水较多, 但错过最佳水热资源, 导致大量氮素存在植株体内。

表1 不同施氮处理下旱地春玉米不同生育时期地上部生物量和籽粒产量

Table 1 Aboveground biomass at the different growth stages and grain yield of dryland spring maize at the different N rates

年份 Year	品种 Varieties	施氮量 N rates	地上部生物量 Aboveground biomass (t hm ⁻²)				籽粒产量 Grain yield (t hm ⁻²)
			V6	VT	R3	R6	
2016	郑单 958	N0	2.17 d	4.78 e	9.67 d	18.22 d	9.98 c
		N75	3.13 c	5.68 d	11.39 c	20.13 c	10.89 b
		N150	3.39 b	6.18 c	13.36 b	21.4 b	11.87 a
		N270	3.46 a	7.02 b	14.91 a	21.93 a	12.22 a
		N360	3.31 b	7.85 a	15.25 a	22.22 a	11.89 a
	陕单 8806	N0	2.07 c	4.94 e	10.47 e	18.17 d	9.77 b
		N75	2.41 b	5.46 d	12.39 d	19.42 c	10.14 b
		N150	2.46 b	6.11 c	13.36 c	20.58 b	10.68 a
		N270	2.67 a	7.11 b	14.61 b	20.97 b	10.97 a
		N360	2.86 a	7.55 a	17.25 a	22.64 a	10.99 a
2017	郑单 958	N0	2.10 d	3.78 d	4.97 d	10.22 d	2.22 e
		N75	2.13 d	4.68 c	6.98 c	12.13 c	2.78 d
		N150	2.39 c	5.20 b	8.96 b	13.40 b	4.47 a
		N270	2.86 b	6.35 a	9.03 b	14.93 a	4.12 b
		N360	3.31 a	6.78 a	9.24 a	15.22 a	3.43 c
	陕单 8806	N0	2.23 c	3.78 d	4.87 d	9.17 e	2.31 e
		N75	2.31 c	4.68 c	5.98 c	10.42 d	3.02 d
		N150	2.49 b	5.13 b	8.98 b	12.59 c	4.17 b
		N270	2.43 b	6.35 a	9.01 b	13.97 b	4.29 a
		N360	3.08 a	6.71 a	9.14 a	14.64 a	3.80 c
2018	郑单 958	N0	2.23 d	5.11 d	9.97 e	13.45 d	6.72 d
		N90	2.81 c	6.16 c	12.39 d	17.42 c	9.68 bc
		N180	3.09 c	6.90 b	13.36 c	22.29 b	9.82 ab
		N270	3.33 b	7.22 a	14.61 b	23.03 a	10.12 a
		N360	3.48 a	7.65 a	15.25 a	23.14 a	9.42 c
	陕单 8806	N0	1.91 c	4.62 d	8.93 d	15.06 d	5.67 d
		N90	2.69 b	5.11 c	12.72 d	18.02 c	7.64 c
		N180	3.11 a	6.86 b	13.51 c	20.80 b	9.75 b
		N270	3.22 a	7.10 a	15.99 b	21.90 a	10.26 a
		N360	3.24 a	7.22 a	16.29 a	21.3 a	9.83 ab
2019	郑单 958	N0	2.08 d	3.78 e	4.57 d	9.87 d	3.21 d
		N90	2.41 c	4.68 d	5.98 c	10.02 c	3.85 c
		N180	2.85 b	5.83 c	9.76 a	13.98 a	5.05 a
		N270	2.86 b	7.35 a	9.62 a	13.97 a	4.61 b
		N360	2.96 a	6.80 b	9.24 b	13.64 b	4.44 b
	陕单 8806	N0	2.01 c	3.48 d	4.97 d	9.87 e	2.85 d
		N90	2.69 b	4.58 c	6.98 c	10.42 d	3.75 c
		N180	2.81 a	6.23 b	8.76 b	12.58 c	4.32 b
		N270	2.91 a	6.35 b	8.83 b	14.07 a	4.91 a
		N360	2.84 a	6.61 a	9.03 a	13.84 b	4.03 bc

ZD958: 郑单 958; SD8806: 陕单 8806。N0: 施氮量为 0 kg hm⁻²; N75: 施氮量为 75 kg hm⁻²; N90: 施氮量为 90 kg hm⁻²; N150: 施氮量为 150 kg hm⁻²; N180: 施氮量为 180 kg hm⁻²; N270: 施氮量为 270 kg hm⁻²; N360: 施氮量为 360 kg hm⁻²。V6: 拔节期; VT: 抽雄期; R3: 乳熟期; R6: 完熟期。同列数据不同字母表示不同处理间差异显著($P \leq 0.05$)。

ZD958: Zhengdan 958; SD8806: Shaandan 8806. N0: 0 kg hm⁻²; N75: N 75 kg hm⁻²; N90: N 90 kg hm⁻²; N150: N 150 kg hm⁻²; N180: N 180 kg hm⁻²; N270: N 270 kg hm⁻²; N360: N 360 kg hm⁻². V6: jointing stage; VT: tasseling stage; R3: milk stage; R6: maturity stage. Values followed by different letters in the same column mean significantly different among different treatments at $P \leq 0.05$.

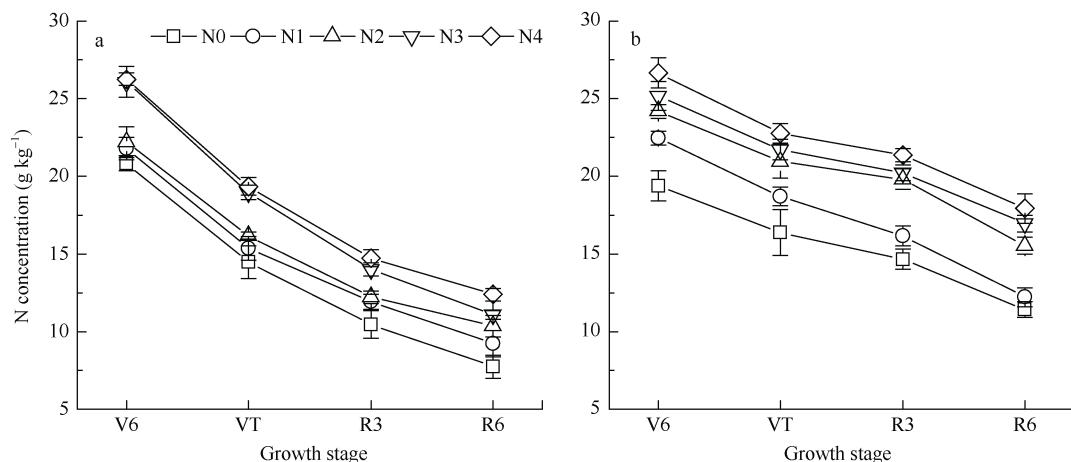


图2 不同降雨状况下旱地春玉米不同生育时期植株氮含量变化

Fig. 2 Plant N concentrations at different stages of dryland spring maize under the different precipitation patterns

a: 穗期多雨; b: 穗期干旱。V6: 拔节期; VT: 抽雄期; R3: 乳熟期; R6: 完熟期。N0、N1、N2、N3、N4 依次表示: 2016–2017 年施氮量分别为 0、75、150、270 和 360 kg hm⁻², 2018–2019 年为 0、90、180、270 和 360 kg hm⁻²。

a: rainy at the ear stage; b: dry at the ear stage. V6: jointing stage; VT: tasseling stage; R3: milk stage; R6: maturity stage. Nitrogen was applied at N0, N1, N2, N3, and N4, that is, 0, 75, 150, 270, and 360 kg hm⁻² from 2016 to 2017, and at 0, 90, 180, 270, and 360 kg hm⁻² from 2018 to 2019.

方差分析表明(表 2), 不同施氮量、不同年际间旱地玉米地上部生物量、植株含氮量和籽粒产量存在

显著或极显著差异, 但两品种之间不存在显著差异。可以说明利用两个品种的数据建立模型的可行性。

表2 旱地玉米不同生育时期地上部生物量、植株含氮量和籽粒产量的方差分析

Table 2 Variance analysis of aboveground biomass, nitrogen uptake, and grain yield at different stages of dryland maize

因子 Factors	V6		VT		R3		R6		籽粒产量 Grain yield (t hm ⁻²)
	DM	N _a							
郑单 958 ZD958	2.82	23.50	6.11	18.49	10.43	15.56	16.53	12.49	7.04
陕单 8806 SD8806	2.71	23.78	5.78	18.05	10.52	15.67	16.02	11.98	6.66
2016	2.79	23.43	6.27	16.87	13.27	12.67	20.57	10.16	10.94
2017	2.53	23.56	7.72	20.11	7.72	18.45	12.67	16.81	3.46
2018	2.91	23.63	6.41	17.27	13.31	12.07	19.64	10.36	8.89
2019	2.64	23.48	6.57	20.51	7.78	18.85	12.23	16.41	4.10
N0	2.10	20.11	4.28	15.43	7.30	12.55	13.01	9.59	5.34
N1	2.57	22.13	5.13	17.04	9.35	14.05	14.75	10.73	6.47
N2	2.82	23.19	6.06	18.57	11.26	16.02	17.20	12.94	7.52
N3	2.97	25.63	6.86	20.35	12.08	17.12	18.11	14.02	7.69
N4	3.14	26.45	7.15	21.06	12.59	18.05	18.33	15.15	7.23
F-value									
年份 Year(Y)	6.10**	0.22 ^{NS}	164***	219***	4938***	831***	5133***	885***	11735***
品种 Variety(V)	0.59 ^{NS}	0.85 ^{NS}	1.11 ^{NS}	0.96 ^{NS}	1.31 ^{NS}	0.37 ^{NS}	0.72 ^{NS}	0.38 ^{NS}	143***
施氮量 Nitrogen(N)	33***	1675***	714***	278***	1947***	335***	1110***	414***	654***
年份×品种 Y×V	0.29 ^{NS}	0.28 ^{NS}	0.71 ^{NS}	0.32 ^{NS}	0.45 ^{NS}	0.12 ^{NS}	0.81 ^{NS}	0.13 ^{NS}	34***
年份×施氮量 Y×N	1.74 ^{NS}	35***	9.31**	4.61*	35***	14***	58***	11.21**	44***
品种×施氮量 V×N	0.08 ^{NS}	2.39 ^{NS}	3.32*	1.03 ^{NS}	13.72**	0.04 ^{NS}	11.21**	0.11 ^{NS}	8.92**
年份×品种×施氮量 Y×V×N	0.05 ^{NS}	1.13 ^{NS}	3.71*	0.34 ^{NS}	15.21**	0.01 ^{NS}	8.91**	0.04 ^{NS}	17.12**

V6: 拔节期; VT: 抽雄期; R3: 乳熟期; R6: 完熟期。DM: 地上部干物质量; N_a: 实际含氮量; ZD958: 郑单 958; SD8806: 陕单 8806。N0、N1、N2、N3、N4 依次表示: 2016–2017 年施氮量分别为 0、75、150、270 和 360 kg hm⁻², 2018–2019 年为 0、90、180、270 和 360 kg hm⁻²。^{NS} 表示无显著差异, *表示 0.05 水平显著, **表示 0.01 水平显著, ***表示 0.001 水平显著。

V6: jointing stage; VT: tasseling stage; R3: milk stage; R6: maturity stage. DM: aboveground biomass; N_a: actual nitrogen uptake; ZD958: Zhengdan958; SD8806: Shaandan8806. Nitrogen was applied at N0, N1, N2, N3, and N4, that is, 0, 75, 150, 270, and 360 kg hm⁻² from 2016 to 2017, and at 0, 90, 180, 270, and 360 kg hm⁻² from 2018 to 2019. ^{NS}, not significant; * indicates significant at $P \leq 0.05$; ** indicates significant at $P \leq 0.01$; *** indicates significant at $P \leq 0.001$.

2.3 旱地春玉米临界氮浓度稀释曲线模型建立

采用 2016 年和 2017 年试验数据分别建立“穗期多雨”和“穗期干旱”2 种降雨状况下旱地春玉米临界氮浓度稀释曲线模型。通过玉米各生育时期地上部生物量和植株含氮量计算得出每个时期临界氮浓度,发现随着地上部生物量增加,临界氮浓度呈下降趋势。分别对 2 种干旱年型地上部生物量和植株氮浓度进行幂函数拟合,建立玉米整个生育时期的临界氮浓度稀释曲线(图 3),两种干旱年型的拟合方程均达到显著水平(a. 穗期多雨: $N_c=35.98\text{DM}^{-0.35}$; b. 穗期干旱: $N_c=35.04\text{DM}^{-0.23}$),决定系数分别为 0.989 和 0.956,表明该模型可以用来表征两种干旱年型春玉米地上部生物量和植株氮浓度的关系。由于年际间降雨波动大,2 种年型玉米干物质积累量取值范围分别介于 $2.8\sim22.6 \text{ t hm}^{-2}$ 、 $2.4\sim13.4 \text{ t hm}^{-2}$ 之间,2016 年和 2018 年春玉米全生育期地上部干物质积累量显著高于 2017 年和 2019 年,这主要与 2017 年和 2019 年拔节至抽雄期干旱(降雨量分别仅为 8.8 mm 和 19.2 mm),导致作物授粉、受精严重受阻,从而错失最佳水热资源,最终导致干物质增长缓慢有关。参数 a 的 95% 的置信区间在 2016 年为 [34.97, 36.97],2017 年为 [33.97, 36.31],可以看出参数 a 基本相同,两者平均值为 35.51 g kg^{-1} ,此外,参数 b 值 2016 年

明显大于 2017 年。由此可见,干旱年型不会改变参数 a 值的大小。

通过对春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变异性(图 3),本研究利用每个取样时期所测植株氮浓度的最小值(N_{\min})、最大值(N_{\max}),得到 2 种降雨状况下旱地春玉米氮素稀释边界模型: (a. 穗期多雨: $N_{\min}=28.63\text{DM}^{-0.45}$, $R^2=0.991$; $N_{\max}=38.89\text{DM}^{-0.35}$, $R^2=0.988$; b. 穗期干旱: $N_{\min}=24.14\text{DM}^{-0.30}$, $R^2=0.891$, $N_{\max}=36.03\text{DM}^{-0.22}$, $R^2=0.898$)。

2.4 旱地春玉米临界氮浓度稀释曲线验证

为验证上述模型的稳定性和可靠性,使用 2018 年和 2019 年独立试验数据分别对 2016 年和 2017 年构建的模型校验精度(a. 穗期多雨: $n=8$; b. 穗期干旱: $n=8$)。具体步骤为:将独立数据中的最大干物质带入临界氮浓度稀释曲线模型后,对比计算值与实测值,通过 1:1 等值图来显示模型的拟合度(图 4)。根据公式得出穗期多雨年曲线的 $\text{RMSE}=1.03$, $n-\text{RMSE}=5.75\%$; 穗期干旱年曲线的 $\text{RMSE}=1.53$, $n-\text{RMSE}=6.78\%$, 标准化均方根误差($n-\text{RMSE}$)均小于 10%,模型稳定性极好。可知所构建的 2 种降雨状况下临界氮稀释曲线模型具有较好精度,表明本研究所建立的临界氮稀释曲线可进一步用于玉米植株氮营养诊断。

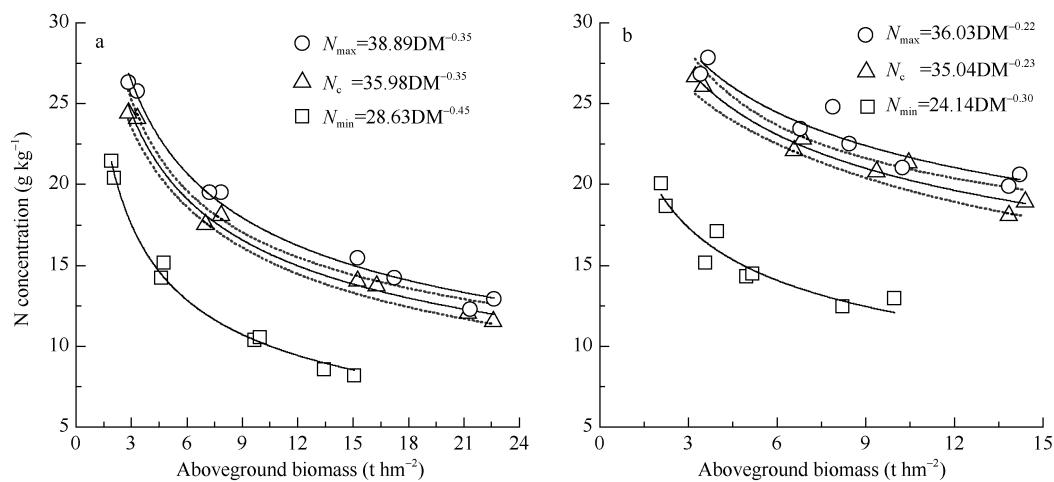


图 3 不同降水状况下旱地玉米植株氮浓度与地上部生物量的关系

Fig. 3 Relationships between the plant N concentrations and aboveground biomass of dryland spring maize under the different precipitation patterns

a: 穗期多雨; b: 穗期干旱。 N_c 、 N_{\min} 和 N_{\max} 分别代表为春玉米植株氮浓度临界值、最小值和最大值。

a: rainy at the ear stage; b: drought at the ear stage. N_c , N_{\min} , and N_{\max} are critical nitrogen concentration, minimum, and maximum of nitrogen concentration in spring maize.

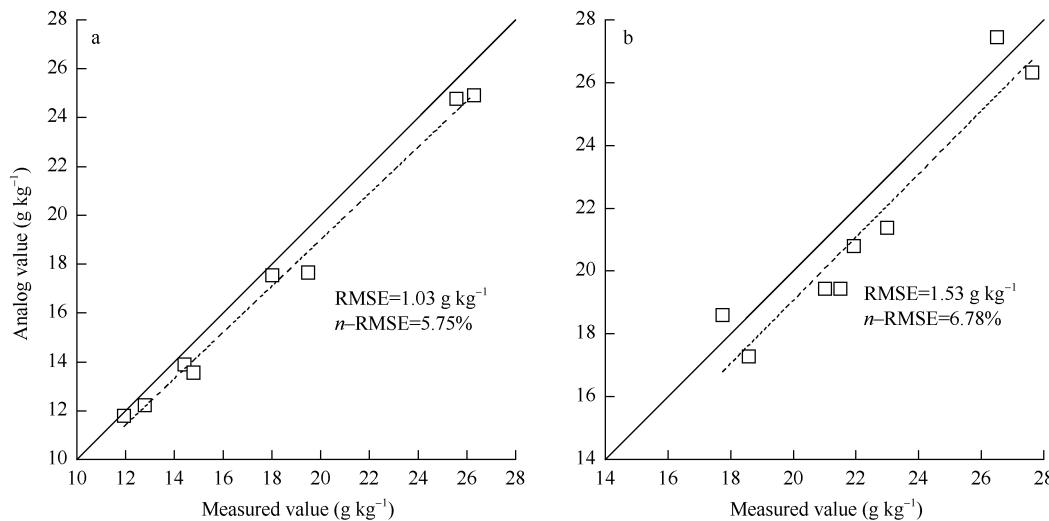


图 4 不同降水状况下旱地玉米临界氮浓度稀释曲线的验证

Fig. 4 Validations of critical nitrogen dilution curve with independent data under different precipitation patterns in dryland spring maize

a: 穗期多雨; b: 穗期干旱。a: rainy at the ear stage; b: drought at the ear stage.

2.5 不同生育时期旱地春玉米氮营养指数动态变化

施氮量和降雨年型显著影响氮营养指数 NNI 的变化, NNI 随着施氮量增加而增加(图 5)。穗期多雨年各生育时期 NNI 变化区间为 0.58~1.18, 其中 N0、N1 和 N2 处理 NNI 均小于 1, 其值分别为 0.69、0.77 和 0.88, 说明氮素不足抑制春玉米的干物质累积过程, N3 处理下不同生育时期 NNI (NNI=1.03)均略高于 1, 表明适宜施氮量介于 N2~N3 之间(180~270 kg hm^{-2}), 穗期干旱年适宜施氮量为 N2 (150~180 kg hm^{-2})。

1, 表明植株氮营养过剩, 超过作物最大生物量累积所需的临界氮浓度。穗期干旱年整个生育时期 NNI 变化区间为 0.60~1.24, 其中 N0 和 N1 处理 NNI 小于 1, 氮素供应不足, 其值分别为 0.67 和 0.79, N2 处理下 NNI (NNI=0.94)略低于 1, 表明施氮适宜, N3 和 N4 处理 NNI 值均显著高于 1, 表现为氮素奢侈吸收。综合考虑春玉米全生育期植株氮营养状况, 穗期多雨年适宜施氮量介于 N2~N3 之间($180\sim270 \text{ kg hm}^{-2}$), 穗期干旱年适宜施氮量为 N2 ($150\sim180 \text{ kg hm}^{-2}$)。

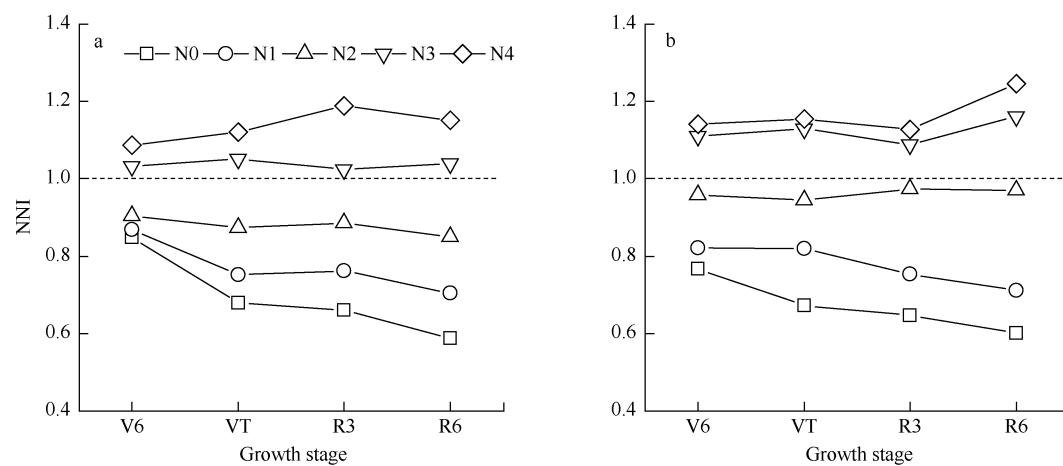


图 5 不同降雨状况下旱地春玉米氮营养指数(NNI)动态变化

Fig. 5 Dynamic changes of nitrogen nutrition index (NNI) under different precipitation patterns in dryland spring maize

a: 穗期多雨; b: 穗期干旱。缩写同图 2。

a: rainy at the ear stage; b: drought at the ear stage. Abbreviations are the same as those given in Fig. 2.

2.6 氮营养指数与相对吸氮量、相对地上部干物质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, 利用 2018 年和 2019 年独立的数据点分别研究 2 种降雨状况下旱地玉米氮营养指数(NNI)与相对吸氮量(RN_{upt})、相对地上部干物质量(RDW)和相对产量(RY)的关系。从图 6 可以看出, 不同干旱年型下旱地春玉米不同生育时期的 NNI- RN_{upt} 均表现为线性相关, RN_{upt} 随 NNI 的增加而增加, 穗期多雨年 V6-R6 各生育时期方程决定系数分别为 0.848、0.868、0.863、0.871, 穗期干旱年 V6-R6 各生育时期方程决定系数分别为 0.940、0.946、0.964、0.937, 均达到极显著水平。从图 7 可以看出, 旱地玉米不同生育时期 NNI 与 RDW 均表现为线性相关, RDW 随着 NNI 的增加而增加, 穗期多雨年 V6-R6 各生育时期方程决定系数分别为 0.892、0.780、0.948、0.895, 穗期干旱年 V6-R6 各生育时期方程决定系数分别为 0.814、0.874、0.897、0.872, 均达到极显著水平。可以看出 NNI 与 RY 二者间呈二次函数关系(图 8), 即 RY 随 NNI 的增加先升高后降低, 两种降水状况

下决定系数分别为 0.878 和 0.928, 均达到极显著水平。穗期多雨年 NNI 值为 1.02 时, RY 获得最大值, 为 0.95; 穗期干旱年 NNI 值为 1.08 时, RY 获得最大值, 为 0.92。

3 讨论

3.1 旱地春玉米临界氮浓度稀释曲线特征

本研究利用 4 年田间定位试验数据建立渭北旱地春玉米生长季 2 种降雨状况下的临界氮稀释曲线, 两种干旱年型下参数 a 值基本相同, 平均为 35.51 g kg⁻¹, 而参数 b 介于 0.23~0.35 之内。参数 a 代表当干物质为 1 t hm⁻² 时的植株氮含量, 表征的是作物生育初期内在的需氮特性。首先, 参数 a 值偏高, 原因可能是: 与李正鹏等^[12]和 Yue 等^[16]构建的模型相比受到气候因素影响, 关中平原和华北平原属于暖温带季风半湿润气候, 夏季炎热, 以种植夏玉米为主, 而渭北旱地属于暖温带半干旱型大陆性季风气候, 以种植春玉米为主。依据积温学说原理^[26], 渭北旱地春玉米生育期(150 d)远高于关中和华北地区(110 d), 生育期延长意味着植株吸氮量增加^[27]。其次, 与

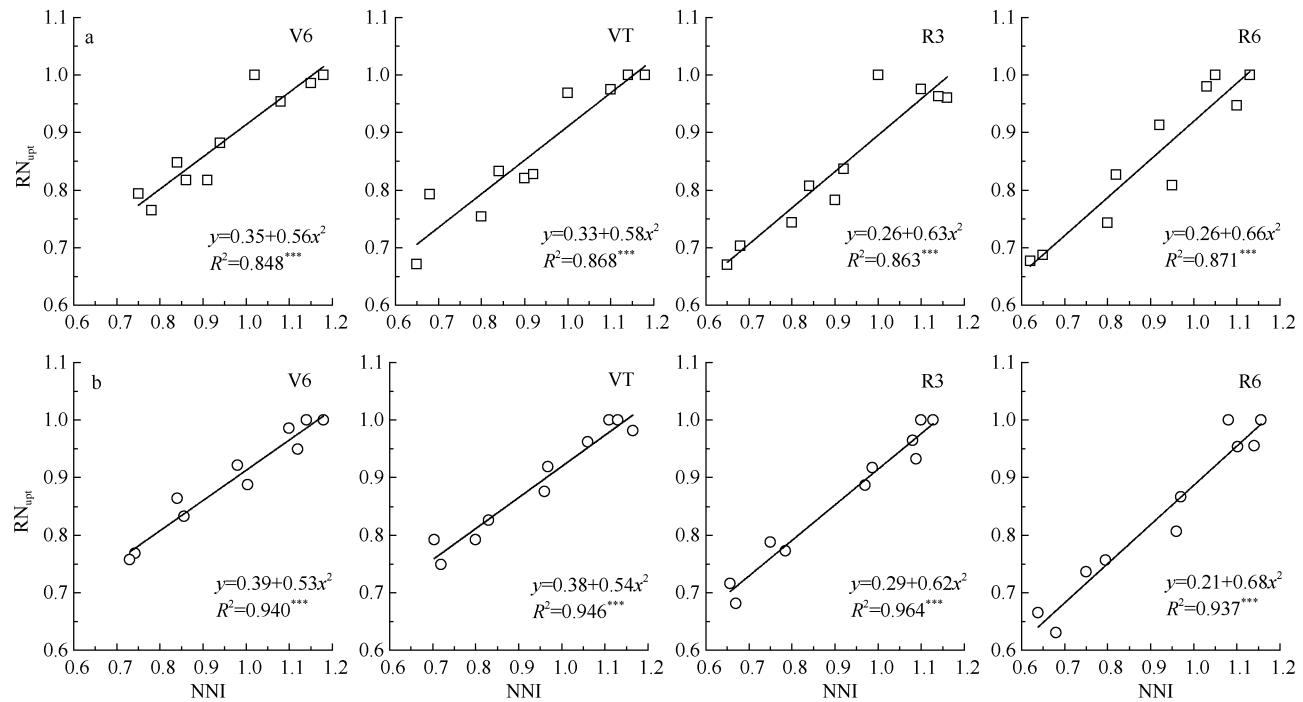


图 6 不同降雨状况下旱地春玉米氮营养指数(NNI)与相对吸氮量(RN_{upt})的关系

Fig. 6 Relationships between nitrogen nutrition index (NNI) and relative nitrogen uptake (RN_{upt}) under different precipitation patterns in dryland spring maize

a: 穗期多雨; b: 穗期干旱。缩写同图 2。***表示 0.001 水平显著。

a: rainy at the ear stage; b: drought at the ear stage. Abbreviations are the same as those given in Fig. 2. *** indicates significant at $P \leq 0.001$.

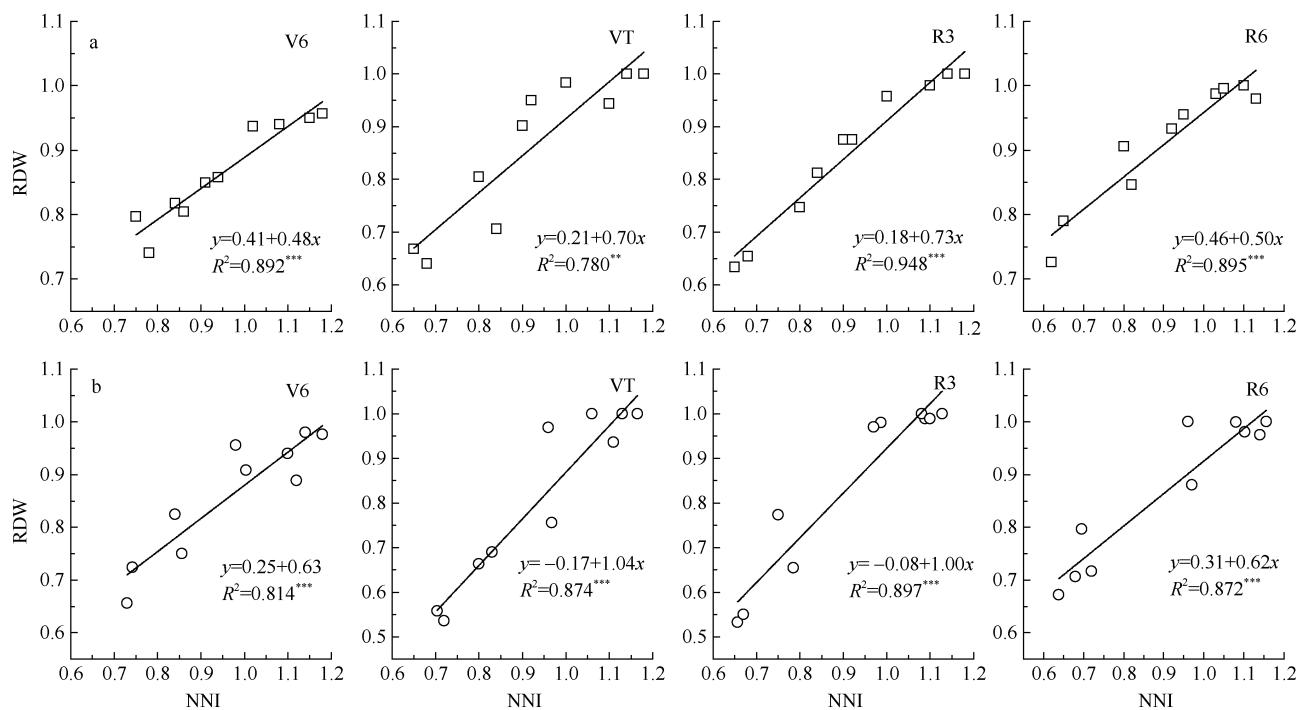


图 7 不同降雨状况下旱地春玉米氮营养指数(NNI)与相对地上部生物量(RDW)的关系

Fig. 7 Relationships between nitrogen nutrition index (NNI) and relative aboveground dry biomass (RDW) under different precipitation patterns in dryland spring maize

a: 穗期多雨; b: 穗期干旱。缩写同图 2。**表示 0.01 水平显著, ***表示 0.001 水平显著。

a: rainy at the ear stage; b: drought at the ear stage. Abbreviations are the same as those given in Fig. 2. ** indicates significant at $P \leq 0.01$; *** indicates significant at $P \leq 0.001$.

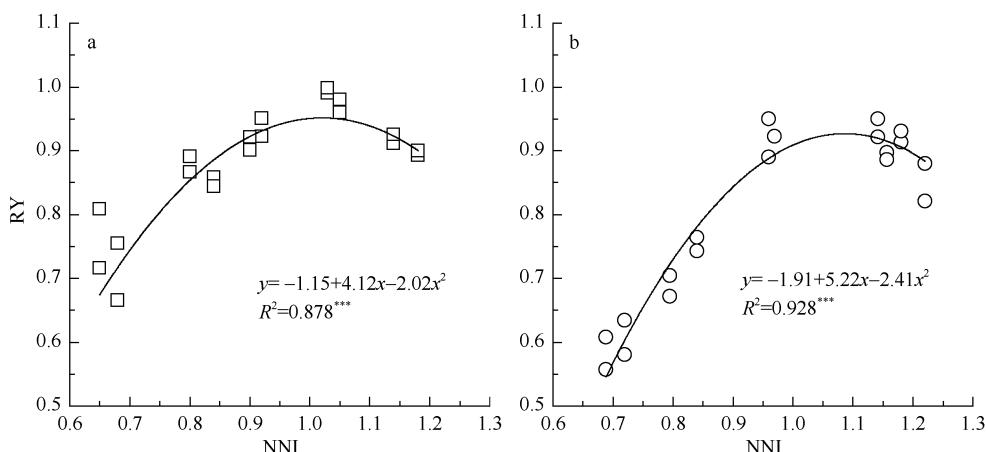


图 8 不同降雨状况下旱地春玉米氮营养指数(NNI)与相对产量(RY)的关系

Fig. 8 Relationships between nitrogen nutrition index (NNI) and relative yield (RY) under different precipitation patterns in dryland spring maize

a: 穗期多雨; b: 穗期干旱。

a: rainy at the ear stage; b: drought at the ear stage.

欧洲国家^[17]春玉米种植区相比, 参数 a 相近, 但仍存在一定差异, 可能与土壤、玉米品种和气候条件有关。参数 b 描述的是植株氮含量随地上部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量的关系, 本研究所得参数 b 在穗期多雨年

(2016 年和 2018 年)为 0.35, 与前人研究结果相比属于合理范围内; 而在穗期干旱年(2017 年和 2019 年)参数 b 为 0.23, 明显偏小, 可能是由于拔节期至抽雄期严重干旱, 抑制作物生长发育, 干旱对茎秆干物质积累影响较叶片更为严重^[28], 导致茎叶比变大,

而叶片是活跃氮素存在的主要载体,故植株氮含量下降缓慢;在灌浆期至成熟期,与多年相同阶段降雨量相比,2017年和2019年降雨量明显偏多,水分充足导致玉米根系活力衰弱过程减慢,加大根系对土壤氮素利用能力,从而减缓植株氮含量稀释过程,最终导致参数b偏小。

考虑到品种差异产生的影响,利用郑单958试验数据构建模型,用陕单8806独立试验数据对构建的模型进行验证,发现构建的两个模型中参数a和参数b基本未发生改变(a.穗期多雨: $N_c=36.95DM^{-0.36}$; b.穗期干旱: $N_c=34.11DM^{-0.23}$)。但由于本试验参试品种较少,所得模型的普适性可能不足,在今后渭北旱地玉米生产实践中,需要增加旱地施氮试验品种数量,以便进一步验证和增强模型的普适性。同时,本研究中构建的临界氮浓度稀释曲线模型,涉及的降雨状况主要为“穗期多雨,花粒期干旱”型和“穗期干旱,花粒期多雨”型,未涉及全生育期干旱型和全生育期多雨型,后期试验可补充人工控制干旱胁迫或提供充足水分条件综合全面分析,进一步不断完善该模型,从而实现模型预测的通用性。

3.2 根据旱地玉米氮营养指数推荐适宜施氮量

氮营养指数(NNI)是基于作物临界氮稀释模型提出的指标,以实际氮浓度与临界氮浓度的比值评价氮素营养状况以及定量动态描述作物生育期内氮素营养状况。本研究计算两种降雨干旱年型不同施氮处理下NNI值发现:穗期干旱年NNI值总体大于穗期多雨年,这与2017年和2019年春玉米拔节至抽雄期受到水分胁迫有关,此期干旱已经导致玉米叶片失水萎蔫,生物量积累缓慢,即使生育后期降水较多,已经难以弥补前期生长亏缺,授粉灌浆过程受阻,产量显著降低。比较两种干旱年型下RY最高时的NNI值,穗期干旱年(NNI=1.08)高于穗期多雨年(NNI=1.02),可能主要由于2017年和2019年生育前期干旱,植株氮素吸收量高,但植株生物量积累少,导致植株实际含氮量较高,氮浓度稀释不足所致。不同干旱年型下玉米籽粒产量对不同施氮量处理的响应程度差异明显,在相同施氮量处理下,穗期干旱年籽粒产量分别仅为穗期多雨年的51.4%。与宁芳等^[29]在渭北旱地推荐的春玉米最佳施氮量相近,说明基于临界氮稀释曲线模型的NNI来评价植株氮营养状况具有可靠性。由于试验中N2(180 kg hm⁻²)和N3(270 kg hm⁻²)处理施氮量相差90 kg hm⁻²,在不同降水状况下由NNI确定的理论施氮量范围差

异很大,这仅仅只是考虑了旱地玉米植株氮素营养需求的理论最高值,如果考虑氮肥边际产量和经济收益,结合两种干旱年型下各生育时期NNI值和产量表现状况,实际生产上穗期多雨年旱地玉米施氮量应该为N2和N3处理的平均值,即施氮量225 kg hm⁻²相对较为适宜。穗期干旱年N2处理下NNI值略低于“1”,表明氮素供应量适中,即施氮量150~180 kg hm⁻²相对较为适宜。同时,虽然在渭北旱地玉米实际生产中,目前多采用氮肥一次性基施方式,但为了保证玉米适时适量氮肥供给,避免生育期内遭遇干旱所致的过量施氮和植株氮素奢侈吸收,应该提倡旱地玉米“因雨精准施氮”管理,具体施氮管理方案为:基肥适当减施氮肥(即施氮量150~180 kg hm⁻²),依据拔节至抽雄期降水量适量追施氮肥(即穗期多雨年可追施氮肥45~75 kg hm⁻²,穗期干旱年不追氮肥),实现旱地玉米氮肥高效利用和增产增收。

4 结论

本研究建立并验证渭北旱地2种不同降雨状况下基于地上部干物质的春玉米临界氮稀释曲线(a.穗期多雨: $N_c=35.98DM^{-0.35}$; b.穗期干旱: $N_c=35.04DM^{-0.23}$),就模型参数的变异性来看,干旱年型对参数a并未产生影响,但会明显改变参数b的大小。本研究利用氮营养指数评价植株氮营养状况,2种降雨状况下N0和N1处理的NNI均小于1,表明存在氮素亏缺现象,N4处理NNI均明显大于1,表现为氮素盈余,存在氮素奢侈吸收现象。根据氮营养指数NNI值和产量表现,渭北旱地玉米最佳施氮方案为基施氮肥150~180 kg hm⁻²,穗期多雨年追施氮肥45~75 kg hm⁻²,穗期干旱年不追氮肥。NNI与相对吸氮量(RN_{upt})、相对干物质量(RDW)和相对产量(RY)等指标间存在极显著相关性。穗期多雨年NNI值为1.02时,RY获得最大值,为0.95;穗期干旱年NNI值为1.08时,RY获得最大值,为0.92。NNI可以直观反映2种降雨状况下旱地春玉米不同生育阶段的氮素盈亏状况。

References

- [1] 山立,邹宇锋.我国旱区农业的地位和发展潜力及政策建议.农业现代化研究,2013,34: 425~430.
Shan L, Zou Y F. Status and potential for development of China's dryland agriculture and suggestions on its policy making. Res Agric Modern, 2013, 34: 425~430 (in Chinese with English abstract).

- [2] Brve K R, Norman J M, Gower S T, Bundy L G. Methodological limitations and N budget differences among a restored tall grass prairie and maize agroecosystems. *Agric Ecosyst Environ*, 2003, 97: 181–198.
- [3] Zheng H L, Liu Y C, Qin Y L, Chen Y, Fan M S. Establishing dynamic thresholds for potato nitrogen status diagnosis with the SPAD chlorophyll meter. *J Integr Agric*, 2015, 14: 190–195.
- [4] Ren T, Peter C, Wang J G, Chen Q, Zhang F S. Root zone soil nitrogen management to maintain high tomato yields and minimum nitrogen losses to the environment. *Sci Hortic*, 2010, 125: 25–33.
- [5] 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. *Remote Sens Environ*, 2003, 86: 542–553.
- [6] 郭建华, 赵春江, 王秀, 陈立平. 作物氮素营养诊断方法的研究现状及进展. 中国土壤与肥料, 2008, (4): 10–14.
- Guo J H, Zhao C J, Wang X, Chen L P. Research advancement and status on crop nitrogen nutrition diagnosis. *Soils Fert Sci China*, 2008, (4): 10–14 (in Chinese with English abstract).
- [7] 马露露, 吕新, 张泽, 马革新, 海兴岩. 基于临界氮浓度的滴灌棉花氮素营养诊断模型研究. 农业机械学报, 2018, 49(2): 277–283.
- Ma L L, Lyu X, Zhang Z, Ma G X, Hai X Y. Establishment of nitrogen nutrition diagnosis model for drip-irrigation cotton based on critical nitrogen concentration. *Trans CSAE*, 2018, 49(2): 277–283 (in Chinese with English abstract).
- [8] 赵犇, 姚霞, 田永超, 刘晓军, 曹卫星, 朱艳. 基于临界氮浓度的小麦地上部氮亏缺模型. 应用生态学报, 2012, 23: 3141–3148.
- Zhao B, Yao X, Tian Y C, Liu X J, Cao W X, Zhu Y. Accumulative nitrogen deficit models of wheat aboveground parts based critical nitrogen concentration. *Chin J Appl Ecol*, 2012, 23: 3141–3148 (in Chinese with English abstract).
- [9] 刘秋霞, 任涛, 张亚伟, 廖世鹏, 李小坤, 丛日环, 鲁剑巍. 华中区域直播冬油菜临界氮浓度稀释曲线的建立与应用. 中国农业科学, 2019, 52: 2835–2844.
- Liu Q X, Ren T, Zhang Y W, Liao S P, Li X K, Cong R H, Lu J W. Determination and application of a critical nitrogen dilution curve for direct-sowing winter oilseed rape in central China. *Sci Agric Sin*, 2019, 52: 2835–2844.
- [10] Yao X, Atauikarim S T, Zhu Y, Tian Y C, Liu X J, Cao W X. Development of critical nitrogen dilution curve in rice based on leaf dry matter. *Eur J Agron*, 2014, 55: 20–28.
- [11] 竺思维, 解君, 罗成, 刘铁宁, 杨宝平, 韩清芳, 刘晓雪. 关中地区大蒜临界氮浓度稀释曲线及验证. 农业工程学报, 2019, 35(19): 126–133.
- Mou S W, Xie J, Luo C, Liu T N, Yang B P, Han Q F, Liu X X. Establishment and verification of critical nitrogen concentration dilution curve of garlic in Guanzhong plain. *Trans CSAE*, 2019, 35(19): 126–133 (in Chinese with English abstract).
- [12] 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. 农业工程学报, 2015, 31(13): 135–141.
- Li Z P, Song M D, Feng H. Development and validation of critical nitrogen content for maize in Guanzhong area. *Trans CSAE*, 2015, 31(13): 135–141 (in Chinese with English abstract).
- [13] 付江鹏, 贺正, 贾彪, 贾慧芳, 李振洲, 刘志. 滴灌玉米临界氮稀释曲线与氮素营养诊断研究. 作物学报, 2020, 46: 290–299.
- Fu J P, He Z, Jia B, Liu H F, Li Z Z, Liu Z. Critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition diagnosis of maize with drip irrigation. *Acta Agron Sin*, 2020, 46: 290–299 (in Chinese with English abstract).
- [14] 安志超, 黄玉芳, 汪洋, 赵亚南, 岳松华, 师海斌, 叶优良. 不同氮效率夏玉米临界氮浓度稀释模型与氮营养诊断. 植物营养与肥料学报, 2019, 25: 123–133.
- An Z C, Huang Y F, Wang Y, Zhao Y, Yue S H, Shi H B, Ye Y L. Critical nitrogen concentration dilution model and nitrogen nutrition diagnosis in summer maize with different nitrogen efficiencies. *Plant Nut Fert Sci*, 2019, 25: 123–133 (in Chinese with English abstract).
- [15] 梁效贵, 张经廷, 周丽丽, 李旭辉, 周顺利. 华北地区夏玉米临界氮稀释曲线和氮营养指数研究. 作物学报, 2013, 39: 292–299.
- Liang X G, Zhang J T, Zhou L L, Li X H, Zhou S L. Critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition index for summer maize in North China Plain. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 292–299 (in Chinese with English abstract).
- [16] Yue S C, Sun F L, Meng Q F, Zhao R F, Li F, Chen X P, Zhang F S, Cui Z L. Validation of a critical nitrogen curve for summer maize in the North China Plain. *Pedosphere*, 2014, 24: 76–83.
- [17] Plenet D, Lemaire G. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. *Plant Soil*, 1999, 216: 65–82.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Lemaire G, Van Oosterom E, 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.
- [22] Gastal F, Lemaire G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *J Exp Bot*, 2002, 53: 789–799.
- [23] Willmott C J. Some comments on the evaluation of model performance. *Bul Am Meteorol Soc*, 1982, 63: 1309–1369.
- [24] Yang J, Greenwood D J, Rowell D L, Wadsworth G A, Burns I G. Statistical methods for evaluating a crop nitrogen simulation model. *Agric Syst*, 2000, 64: 37–53.
- [25] Jamieson P D, Porter J R, Wilson D R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Res*, 1991, 27: 337–350.
- [26] Liu J L, Zhan A, Bu L D, Zhu L, Luo S S, Chen X P, Cui Z L, Li S Q, Hill R L, Zhao Y. Understanding dry matter and nitrogen accumulation for high-yielding film-mulched maize. *Agron J*, 2014, 106: 390–396.

- [27] Pommel B, Gallais A, Coque M, Quilleré I, Hirel B, Peioul J L, Andrieu B, Floriot M. Carbon and nitrogen allocation and grain filling in three maize hybrids differing in leaf senescence. *Eur J Agron*, 2006, 24: 203–211.
- [28] Maryam H, Farhan A, Kaveh Z. Effect of drought stress on some morphological, physiological and agronomic traits in various foliage corn hybrids. *Am-Eurasian J Agric Environ Sci*, 2012, 12: 890–896.
- [29] 宁芳, 张元红, 温鹏飞, 王瑞, 王倩, 董朝阳, 贾广灿, 李军. 不同降水状况下旱地玉米生长与产量对施氮量的响应. *作物学报*, 2019, 45: 777–791.
Ning F, Zhang Y H, Wen P F, Wang Q, Dong Z Y, Jia G C, Li J. Responses of maize growth and yield to nitrogen application in dryland under different precipitation conditions. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 777–791 (in Chinese with English abstract).