

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.028

基于临界氮浓度的宁夏玉米氮吸收与亏缺模型研究

贾彪 付江鹏

(宁夏大学农学院, 银川 750021)

摘要:以宁夏回族自治区当地玉米主栽品种天赐19为试验材料,设置6个氮素水平(0、90、180、270、360、450 kg/hm²),研究滴灌玉米地上部生物量和氮累积动态变化,构建玉米临界氮稀释曲线模型,在此基础上构建氮吸收模型和氮累积亏缺模型,实现对滴灌玉米氮素营养状况的快速诊断。结果表明,滴灌玉米地上部干物质质量增长和氮吸收累积均受施氮水平的影响,且随生育进程的推进呈上升趋势,氮累积量过高或过低均不利于产量形成,玉米植株存在氮奢侈消费现象;滴灌玉米临界氮浓度、最高和最低氮浓度与地上部干物质质量之间均可用幂函数方程表示,其平均决定系数 R^2 分别为0.976、0.903和0.941,均达到极显著水平;基于临界氮浓度构建的氮吸收模型和氮累积亏缺模型对滴灌玉米生育期内氮素营养诊断结果一致,综合施氮量与产量的拟合曲线,推荐宁夏引黄灌区滴灌玉米施氮量以270~311 kg/hm²为宜。研究结果可为宁夏引黄灌区滴灌玉米实现精准施肥和优化氮素管理提供理论参考。

关键词:玉米;水肥一体化;临界氮浓度;氮吸收模型;氮亏缺模型

中图分类号: S275.6; S513

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)01-0256-08

OSID:



Nitrogen Uptake and Nitrogen Deficit Model of Drip Irrigation Maize in Ningxia Based on Critical Nitrogen Concentration

JIA Biao FU Jiangpeng

(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to explore the model of critical nitrogen dilution curve of maize under the integrated mode of drip irrigation and water fertilization, local maize main variety "Tianci 19" of Ningxia Hui Autonomous Region was used as the experimental material, and six nitrogen levels (0 kg/hm², 90 kg/hm², 180 kg/hm², 270 kg/hm², 360 kg/hm² and 450 kg/hm²) were set, the dynamic changes of aboveground biomass and nitrogen accumulation in drip irrigation maize were studied, a critical nitrogen dilution curve model of maize was constructed, and a nitrogen absorption model and nitrogen accumulation deficit model were built on this basis to achieve rapid diagnosis of nitrogen nutrition status of drip irrigation maize. The results showed that the dry matter quality and nitrogen uptake of the aboveground drip irrigation were affected by the nitrogen application level, and it was increased with the progress of the growth process. The excessive or too low nitrogen accumulation was not conducive to the formation of yield, and the nitrogen of maize plants, the luxury consumption phenomenon existed. The critical nitrogen concentration, the highest and the lowest nitrogen concentrations of the drip irrigation maize can be expressed by the power function equation, and the average coefficient of determination R^2 was 0.976, 0.903 and 0.941, respectively, which reached extremely significant level. The nitrogen uptake model and the nitrogen accumulation deficit model based on the critical nitrogen concentration were consistent with the results of nitrogen nutrition diagnosis during the growth period of drip irrigation maize, and the fitting curve of comprehensive nitrogen application rate and yield, recommending the nitrogen application rate of drip irrigation maize in Ningxia Yellow River Irrigation District as 270~311 kg/hm². The research result provided a theoretical reference for the precise fertilization and optimized nitrogen management of drip irrigation maize in Ningxia Yellow River Irrigation District.

Key words: maize; integrated water and fertilizer application; critical nitrogen concentration; nitrogen uptake model; nitrogen deficit model

收稿日期: 2019-05-21 修回日期: 2019-06-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(31560339)、宁夏回族自治区科技重大专项(2018BBF0200404)、宁夏区重点研发计划项目(2018BBF02018)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD22B01)

作者简介: 贾彪(1976—),男,副教授,博士,主要从事农业信息技术与精准农业研究,E-mail: jiabiao2008@163.com

0 引言

氮肥对玉米生长发育起着至关重要的作用,合理施用氮肥可以增加玉米干物质积累量^[1],促进植株对氮素的吸收^[2],从而提高产量^[1]。目前,农业生产过程中不合理施用氮肥导致的环境污染问题日益突出^[3],与氮肥相关的水体污染^[4]、土壤污染^[5]和大气污染^[6]等成为现代农业研究的热点问题。因此明确玉米不同生育时期的临界氮浓度,对减少污染、增加产量、保护环境和实现农业可持续发展具有重要意义。

精确诊断植株氮素营养状况是合理施肥的基础。前人针对测土配方施肥^[7]、SPAD 计快速诊断^[8]、光谱遥感^[9]和机器视觉^[10]等植株氮素营养精确诊断方法做了大量研究,但是这些作物氮素营养诊断技术受成本和普及度的影响,推广存在一定困难。临界氮浓度 N_c 是作物在生长过程中获得最大生物量增长所需要的最少氮营养^[11],确定临界氮浓度是进行作物氮素营养诊断的基本方法之一^[12]。近年来, N_c 因其在作物氮诊断中的准确性和稳定性而受到广泛关注,关于临界氮稀释曲线模型,相继有诸多国内外学者分别在水稻^[13-14]、小麦^[15-16]、马铃薯^[17]、棉花^[18]、番茄^[19]等作物上进行了研究。在玉米研究中,梁效贵等^[20]构建了河北省夏玉米全生育期临界氮稀释曲线模型($N_c = 34.914D_M^{-0.4134}$, D_M 为植株地上部干物质累积量);银敏华等^[21]针对陕西关中地区夏玉米,构建了施用2种肥料时的临界氮稀释曲线模型(尿素: $N_c = 33.806D_M^{-0.308}$;控释氮肥: $N_c = 34.356D_M^{-0.339}$);安志超等^[22]构建了河南省2种玉米品种的临界氮稀释曲线模型(伟科702: $N_c = 35.638D_M^{-0.341}$;中单909: $N_c = 30.801D_M^{-0.370}$)。这些研究均表明,不同地区、作物品种、土壤类型、水肥管理和环境条件等因素间的模型存在一定的差异。宁夏引黄灌区光温资源充足,年降雨量少,蒸发量大,以灌溉农业为主,在滴灌水肥一体化条件下对该地区玉米临界氮稀释模型进行区域化研究很有必要。

本研究以当地主栽品种天赐19为对象,通过2年田间定位试验,研究滴灌玉米基于临界氮稀释曲线的氮吸收模型与氮累积亏缺模型,旨在探究临界氮稀释曲线在宁夏引黄灌区的适用性,以期在水肥一体化条件下玉米定量和精准施用氮肥提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2017、2018年4—9月在宁夏回族自治区

区农垦平吉堡农场(106°1'47"E, 38°25'30"N)进行。该地海拔为1100 m,多年平均温度、降雨量和蒸发量分别为8.6℃、272.6 mm和2325 mm,其中玉米生育期气象数据如图1所示。试验田基础土壤肥力(0~20 cm)pH值7.71,有机质质量比12.56 g/kg、全氮质量比0.63 g/kg、全磷质量比0.51 g/kg、碱解氮质量比34.00 mg/kg、速效磷质量比19.37 mg/kg和速效钾质量比84.31 mg/kg。

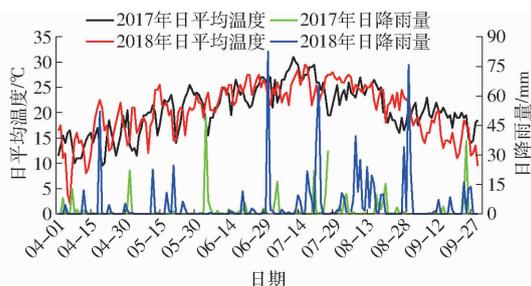


图1 玉米生育期气象数据

Fig. 1 Meteorological data during growth period of maize

1.2 试验设计

供试玉米品种为天赐19。试验设6个水平,施氮量分别为0、90、180、270、360、450 kg/hm²,以N0、N90、N180、N270、N360、N450表示,小区面积67.5 m²,重复3次,随机区组排列。种植密度约9 × 10⁴株/hm²,采用宽窄行种植,宽行70 cm,窄行40 cm。

采用水肥一体化滴灌施肥技术,肥料由施肥罐随水施入,窄行玉米中间布设1条滴灌带,2行玉米由1条滴灌带控制,滴灌带滴头间距为30 cm,滴头流量2.5 L/h,滴头工作压力0.1 MPa。灌水量以作物需水量($ET_c = K_c ET_0$, ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量, K_c 为作物系数)为基础,依据2006—2016年过去10年气象数据按Penman Monteith修正公式计算^[23],然后取平均值。 K_c 前期(苗期—拔节期)取0.7,中期(吐丝期—灌浆期)取1.2,后期(乳熟期)取0.6^[23]。玉米全生育期灌水总量为400 mm,苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期灌水量分别为20、100、140、120、20 mm,灌水次数分别为1、3、2、3、1次。2年生育期各施肥8次,分别于苗期1次、拔节期3次、抽雄期1次、灌浆期3次,每次施肥量占总施肥量的比例分别为苗期10%、拔节期45%、抽雄期20%、灌浆期25%。供试氮肥为尿素(总N质量分数大于等于46.4%),磷钾肥随水施入(P_2O_5 138 kg/hm²和 K_2SO_4 120 kg/hm²)。2017年和2018年分别于4月26日、4月28日播种,9月16日、9月18日收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 地上部植株生物量

于玉米拔节期、小喇叭口期、大喇叭口期、吐丝

期、乳熟期、腊熟期和成熟期(播种后 45、55、65、85、95、105、115 d)共计破坏性取样 7 次,每个小区选取长势一致的 3 株,将器官分成为茎、叶和穗 3 部分,于 105℃干燥箱中杀青 30 min,80℃干燥至质量恒定后称量。

1.3.2 地上部植株含氮量

将各处理的干样粉碎、研磨、过筛,利用凯氏定氮法对植株各器官全 N 含量进行测定,最后计算出植株氮浓度^[14]。

1.3.3 产量

在玉米收获期每小区随机选取植株完整的长方形地块(1.1 m × 3 m)进行样方选择,把样方内的所有玉米果穗带回实验室,脱粒,玉米籽粒折合 14% 的含水率进行产量计算。

1.4 模型构建

1.4.1 临界氮稀释曲线模型

根据 JUSTES 等^[24]提出的临界氮稀释曲线模型计算方法,其建模步骤如下:对不同施氮处理下的地上部干物质积累量进行方差分析,将其分为 2 类,即限氮和非限氮。对于玉米生长受氮素限制的施氮水平,将其地上部干物质积累量与对应的氮浓度进行曲线拟合。对于玉米生长不受氮素限制的施氮水平,用其地上部干物质积累量的平均值代表最大生物量。每次采样日的理论临界氮浓度由上述线性曲线与以最大生物量为横坐标的垂线的交点纵坐标确定。

按 GREENWOOD 等^[12]提出的临界氮浓度定义,其模型表达式为

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

式中 a 、 b ——模型参数

1.4.2 氮吸收模型

滴灌玉米地上部氮吸收量与地上部积累的最大干物质之间关系为

$$N_{upt} = N_c D_M \quad (2)$$

式中 N_{upt} ——玉米地上部氮吸收量,kg/hm²

将式(1)代入式(2)得到玉米临界氮吸收模型

$$N_{uptc} = aD_M^{1-b} \quad (3)$$

式中 N_{uptc} ——临界氮吸收量,kg/hm²

其中 $1-b$ 表示生长参数,为氮相对吸收速率与地上部生物量积累速率之比。

1.4.3 氮亏缺模型

根据式(1)可推导出玉米临界氮积累方程式(3),并可推导出氮积累亏缺方程,其推导过程参照 LEMAIRE 等^[25]的研究方法,方程为

$$N_{and} = N_{uptc} - N_{na} \quad (4)$$

式中 N_{and} ——氮积累亏缺量,kg/hm²

N_{na} ——实际氮积累量,kg/hm²

若 $N_{and} = 0$,表示植株体内氮素积累恰好合适;若 $N_{and} > 0$,表示植株体内的氮积累不足;若 $N_{and} < 0$,表示植株体内氮积累过剩。

1.5 数据处理

采用 Excel 2013 进行数据汇总与计算,Origin 2018 作图,SPSS 22.0 进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 滴灌玉米地上部干物质动态变化

如图 2(图中不同小写字母表示各处理在 0.01 水平差异显著)所示,玉米干物质积累量随生育进程的推进呈增加的趋势。在播后 55 d 最低,在播后 115 d 升至最高,变幅在 1.24 ~ 16.08 t/hm²之间;在播后 65 d 不同氮素水平玉米干物质质量差异明显增大。不同年份、同一生育时期,地上部干物质质量随着施氮水平的提高呈增加趋势。由于 2017—2018 年玉米拔节期各处理地上部干物质质量小于 1 t/hm²,故对拔节期数据予以舍弃。对比分析不同氮素水平下玉米成熟期干物质质量,整体上由小到大依次为:N0、N90、N180、N270、N360、N450。

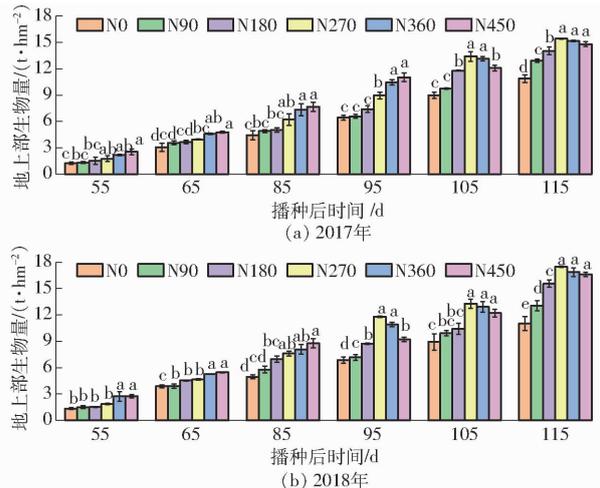


图 2 滴灌玉米地上部生物量的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of dry matter quality in drip irrigation maize

2.2 滴灌玉米植株氮积累量动态变化

如图 3 所示,玉米植株氮积累量随着播种后时间的增加呈上升趋势。不同年份、同一生育时期,玉米植株氮素积累量随施氮水平的提高而增加。由于玉米植株对氮素的吸收积累能力并非无极限,因而当玉米植株体内的氮积累量达到一定限度时,并不随着施氮水平的提高而增加,而是趋于一个稳定的数值范围内,故 N270、N360 和 N450 的氮积累量较相近。

2.3 滴灌玉米产量效应分析

如图 4(图中 ** 表示在 0.01 水平差异显著)所

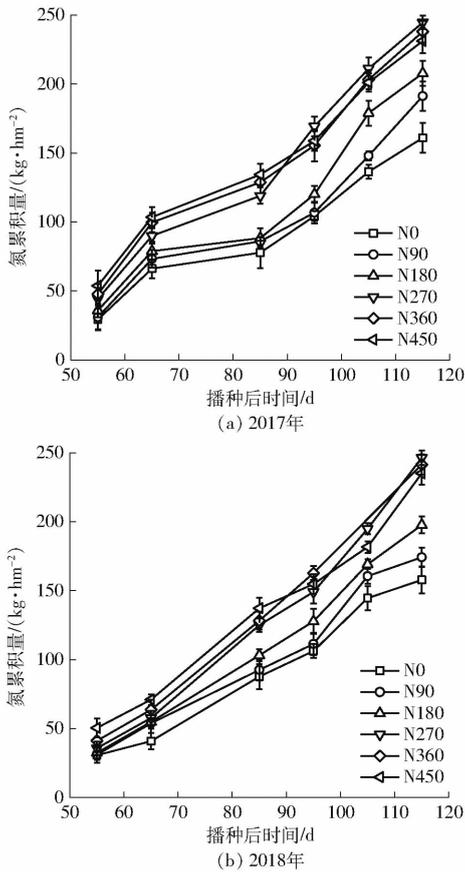


图 3 滴灌玉米植株氮积累量动态变化曲线
Fig. 3 Dynamic changes of nitrogen accumulation in drip irrigation maize plants

示,滴灌玉米产量随施氮量的增加而显著增加,但当施氮水平超过一定界限后产量不再增加反而降低。由拟合曲线得到相应的滴灌玉米理论平均适宜施氮量为 311 kg/hm^2 , 产量为 13.958 t/hm^2 。

由图 4 可以看出,滴灌玉米地上部干物质质量和产量均受到氮素水平的影响,适宜的氮素水平有利于干物质质量和产量的形成。对比不同氮素水平下滴灌玉米地上部生物量和产量可发现,一定施氮范围内,干物质质量与产量均随施氮水平的提高而增加,当施氮量达到一定水平时,再增加施肥量,生物量没有明显变化,但是产量却有下降的趋势,表明只有在适宜施氮量时,产量与生物量才能达到最高。可见,滴灌玉米在生长过程中存在一定的临界需氮量。

2.4 滴灌玉米临界氮浓度稀释曲线模型

从图 5 可知,在相同的干物质质量条件下,随着施氮水平的提高,其氮浓度呈升高趋势。不同年份、不同氮素水平下玉米地上部植株氮浓度与干物质质量间的关系,均符合幂函数关系,各施氮量处理间滴灌玉米干物质质量与植株氮浓度间幂函数关系见表 1。

按照 JUSTES 等^[24]对临界氮浓度的计算方法,利用式(1)构建了不同年份滴灌玉米临界氮稀释曲

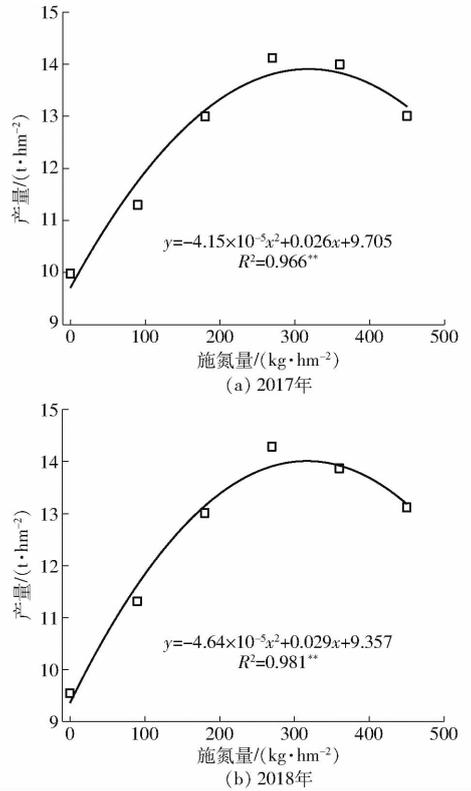


图 4 滴灌玉米产量动态变化曲线
Fig. 4 Dynamic curves of drip irrigation maize yield

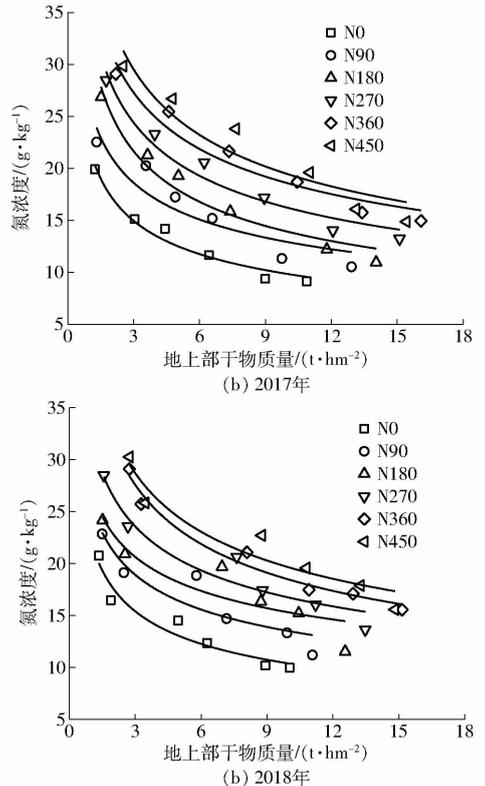


图 5 不同氮素水平下玉米氮浓度与生物量的关系
Fig. 5 Relationship between nitrogen concentration and biomass of maize under different nitrogen levels

线模型,如图 6 (图中 N_{max} 、 N_{min} 表示最大、最小临界氮浓度)所示。结果显示 2017 年和 2018 年的拟合方程决定系数分别为 0.969 和 0.982,均达到了极

表1 滴灌玉米干物质量与氮浓度间幂函数方程

Tab.1 Power function equation between dry matter quality and nitrogen concentration of drip irrigation maize

氮素水平	2017年		2018年	
	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
N0	$N = 21.909D_M^{-0.347}$	0.964 **	$N = 22.074D_M^{-0.328}$	0.922 **
N90	$N = 25.988D_M^{-0.303}$	0.834 **	$N = 25.732D_M^{-0.281}$	0.812 **
N180	$N = 32.446D_M^{-0.368}$	0.953 **	$N = 27.105D_M^{-0.249}$	0.779 **
N270	$N = 35.448D_M^{-0.339}$	0.953 **	$N = 32.216D_M^{-0.285}$	0.913 **
N360	$N = 38.787D_M^{-0.320}$	0.937 **	$N = 39.752D_M^{-0.333}$	0.968 **
N450	$N = 43.219D_M^{-0.346}$	0.878 **	$N = 40.563D_M^{-0.315}$	0.904 **

注：**表示在0.01水平上差异显著,下同。

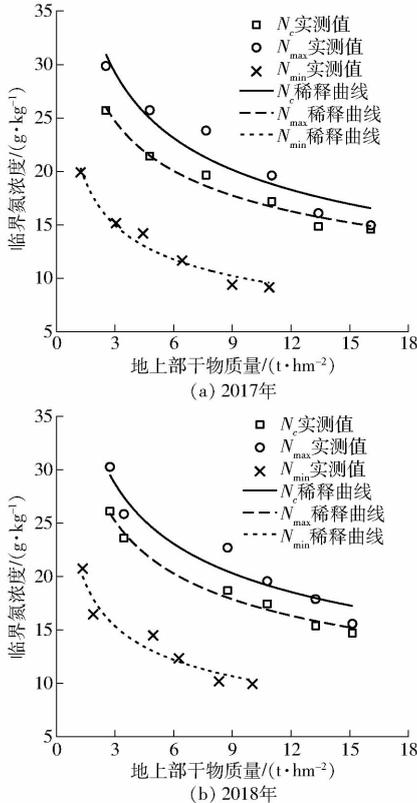


图6 基于地上部干物质量的临界氮浓度稀释曲线

Fig.6 Critical nitrogen concentration dilution curves based on above ground dry matter

显著水平(表2),表明临界氮稀释曲线可以很好地描述滴灌玉米地上部生物量与植株氮浓度的关系。

表2 滴灌玉米临界氮稀释曲线模型和氮吸收模型参数

Tab.2 Critical nitrogen dilution curve model and nitrogen absorption model parameter value of drip irrigated maize

模型	参数	N_c, N_{upte}			N_{max}, N_{uptmax}			N_{min}, N_{uptmin}		
		2017年	2018年	均值	2017年	2018年	均值	2017年	2018年	均值
临界氮稀释曲线模型	a	34.390	35.504	34.947	42.424	40.516	41.470	21.909	22.108	22.009
	b	0.301	0.312	0.3065	0.338	0.314	0.326	0.347	0.332	0.339
	R^2	0.969 **	0.982 **	0.976 **	0.899 **	0.907 **	0.903 **	0.964 **	0.918 **	0.941 **
氮吸收模型	a	34.39	35.504	34.947	42.424	40.516	41.47	21.909	22.108	22.009
	$1-b$	0.699	0.688	0.6935	0.662	0.686	0.674	0.653	0.668	0.661
	R^2	0.957 **	0.961 **	0.959 **	0.911 **	0.894 **	0.903 **	0.927 **	0.903 **	0.915 **

注：**表示在0.01水平差异显著。

采用式(1)、(3)对上述确定的临界氮浓度与对应的最大干物质量进行拟合,得到滴灌玉米临界氮浓度模型和氮吸收模型参数,如表2所示。

2.5 滴灌玉米氮吸收模型

根据式(3)可得到各取样日玉米临界氮累积量,将其分别与不同氮素水平下实测氮累积量进行对比,结果如图7所示。不同氮素水平下氮累积量与临界氮累积量的相对误差(各拟合直线斜率与1的相对误差)2017年为31.24%、19.60%、8.38%、1.54%、2.05%、3.76%,2018年分别为22.63%、16.27%、11.02%、3.54%、6.52%、8.91%,说明施氮量以270 kg/hm²为宜。

2.6 滴灌玉米氮亏缺模型

由图8可知,各生育期 N_{and} 均随施氮水平的提高而减小,甚至有负值出现。各施氮处理植株 N_{and} 均随播种后时间的增加而增加,在N0、N90和N180施氮水平时, N_{and} 均大于0,表明植株体内氮素积累量不足;在N360和N450处理施氮水平时, N_{and} 小于0,表明植株体内氮积累量过剩;在N270施氮水平时, N_{and} 在0上下波动,表明施氮量在270 kg/hm²时植株体内氮素积累较为适宜。

3 讨论

3.1 施氮对滴灌玉米干物质量、氮累积和产量的影响

作物氮素吸收是作物光合产物的基础,与作物

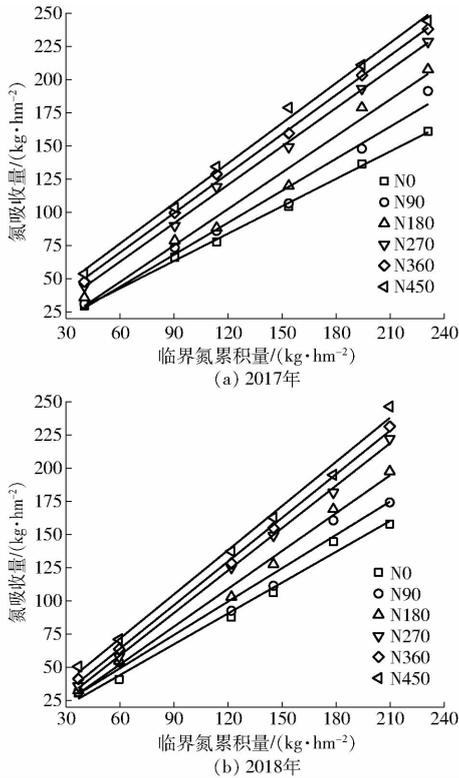


图7 滴灌玉米氮吸收量与临界氮累积量的关系
Fig.7 Relationship between nitrogen uptake and critical nitrogen accumulation in drip irrigation maize

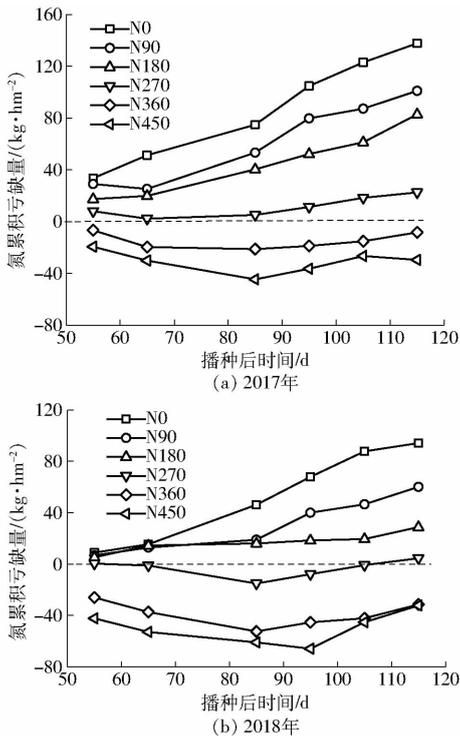


图8 滴灌玉米氮累积亏缺量动态变化曲线
Fig.8 Dynamic variation curves of nitrogen deficiency deficit in drip irrigation maize

其随生育进程的推进呈上升趋势(图2和图3), N270施氮水平下各特征值较为协调,对生物量和氮累积较为有利,尽管N360和N450施氮水平的干物质质量较高,但其氮累积量过高,过多的氮储存在植株中,造成氮奢侈消耗,导致产量下降(图4)。本研究进一步表明,产量并非与施氮水平和氮累积量呈正相关,过多施氮将导致产量下降^[28]。可以推测玉米存在氮奢侈消费现象,因而根据动态变化可判定有临界氮浓度稀释曲线存在。

3.2 玉米临界氮浓度稀释模型比较

本研究以2年田间定位试验构建了宁夏引黄灌区不同年份玉米临界氮稀释曲线模型(图6),通过比较不同年份临界氮稀释曲线模型,其对应的模型中,参数 a 和 b 均存在一定差异。由于2年玉米生育期降雨量不同造成生长之间存在差异(图1),2018年玉米干物质质量较高于2017年,这主要由于2017年降雨量少,从而水热资源供应不足,最终导致干物质质量低于2018年。此外,随着干物质质量的增加,氮含量曲线均呈现下降趋势,参数 b 值2018年大于2017年。参数 a 的95%的置信区间2017年介于33.753~34.991之间,2018年介于32.862~35.911之间,可以看出两者差异不大,平均值为34.947。由此可见,降雨量不会改变模型 a 值。

从构建的模型角度来看,其形式上与文献[20-22]针对华北地区、陕西关中地区和豫中地区建立的玉米临界氮稀释模型一致,其取样时间(播种后45d)与银敏华等^[21](种植后45d)相同,这说明临界氮浓度稀释模型的建立与玉米的生育期无明显的关系,所得模型 b 均值为0.307,与梁效贵等^[20]构建模型 b 值(0.4134)、安志超等^[22]所建立的模型 b 值(0.370和0.341)、银敏华等^[21]施用控释氮肥构建模型 b 值(0.339)差异较大;与银敏华等^[21]施用尿素构建模型 b 值(0.308)极为接近。但模型 a 值(34.947)与梁效贵等^[20](34.914)极为接近;与银敏华等^[21](33.806和34.356)和安志超等^[22](35.638和30.801)的研究结果有所差异,说明宁夏引黄灌区滴灌玉米的氮吸收能力比华北地区、陕西关中地区和豫中地区的玉米(中单909)氮吸收能力强,但是低于豫中地区玉米(伟科702)的氮吸收能力。其原因可能是宁夏引黄灌区玉米采用水肥一体化滴灌施肥模式,遵循“少量多次”的原则,这与梁效贵等^[20]分基施40%和大喇叭口期追施60%2次施入、银敏华等^[21]施用尿素时基追比为2:3施入和施用控释氮肥时作基肥一次施入、安志超等^[22]分基施1/3和大喇叭口期开沟追施2/3不同,说明玉米氮素吸收能力可能受施肥方式的影响,也可能是

产量密切相关^[26]。WOOD等^[27]研究表明,植株氮吸收累积与干物质累积密切相关。本研究表明,滴灌玉米植株对氮的容纳有一定的限度,地上部干物质质量增长和氮吸收累积均受施氮水平的影响,且

由于玉米品种、土壤类型和气候条件等不同所导致,或是这些因素的共同作用所影响,但究竟是何种因素影响较大,仍需设计试验进一步探讨。

3.3 滴灌玉米氮素营养诊断评价

氮亏缺量可精确地诊断、衡量植株氮素营养状况,对定量作物生长发育过程中的施肥量具有重要的指导意义。若 N_{and} 等于 0, 表示植株体内氮素积累恰好合适;若 N_{and} 大于 0, 表示植株体内的氮积累不足;若 N_{and} 小于 0, 表示植株体内氮积累过剩。银敏华等^[21]利用氮累积亏缺模型对玉米不同生长阶段的氮素营养状况进行诊断,结果发现施用 2 种肥料(尿素和控释肥)的最佳施氮量分别为 160 kg/hm²和 120 kg/hm²左右。本研究结果表明,供试玉米品种的施氮水平为 270 kg/hm²时, N_{and} 在 0 附近波动(图 8),表明施氮量在 270 kg/hm²时植株体内氮素积累较为适宜。利用 N_{and} 确定的最佳施氮量与张富仓等^[29]基于最小二乘法推荐的宁夏滴灌玉米适宜施氮量(210 ~ 325 kg/hm²)的研究结果基本一致。

因此,进一步表明氮亏缺量可以很好地评估玉米的氮素营养状况。

4 结束语

利用 2 年 6 个氮素水平的定位试验数据,建立了宁夏引黄灌区滴灌玉米临界氮浓度稀释曲线模型,结果表明,滴灌玉米地上部干物质量增长和氮吸收累积均受施氮水平的影响,且其随生育进程的推进呈上升趋势,氮素积累过高或过低均不利于产量形成,玉米植株存在氮奢侈消费现象;滴灌玉米临界氮浓度(N_c)、最高(N_{max})和最低(N_{min})氮浓度与地上部干物质量之间均可用幂函数方程来表示,其平均决定系数 R^2 分别为 0.976、0.903、0.941,均达到极显著水平;基于临界氮浓度构建的氮吸收模型和氮积累亏缺模型对滴灌玉米生育期内氮素营养诊断结果一致,综合施氮量与产量的拟合曲线,推荐宁夏引黄灌区滴灌玉米施氮量以 270 ~ 311 kg/hm²为宜。

参 考 文 献

- [1] BOOMSMA C R, SANTINI J B, TOLLENAAR M, et al. Maize per-plant and canopy-level morpho-physiological responses to the simultaneous stresses of intense crowding and low nitrogen availability[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101: 1426 - 1452.
- [2] 王俊忠, 黄高宝, 张超男, 等. 施氮量对不同肥力水平下夏玉米碳氮代谢及氮素利用率的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 2045 - 2052.
WANG Junzhong, HUANG Gaobao, ZHANG Chaonan, et al. Influence of nitrogen fertilizer rate on carbon - nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency of summer maize under high and medium yield levels[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2045 - 2052. (in Chinese)
- [3] 张卫峰, 马林, 黄高强, 等. 中国氮肥发展、贡献和挑战[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(15): 3161 - 3171.
ZHANG Weifeng, MA Lin, HUANG Gaoqiang, et al. The development and contribution of nitrogenous fertilizer in China and challenges faced by the country[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(15): 3161 - 3171. (in Chinese)
- [4] BOWMAN W D, CLEVELAND C C, HALADA L, et al. Negative impact of nitrogen deposition on soil buffering capacity[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(11): 767 - 770.
- [5] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008 - 1010.
- [6] LIU X, ZHANG Y, HAN W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459 - 462.
- [7] 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.
- [8] ZHENG H, LIU Y, QIN Y, 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.
- [9] REN T, PETER C, WANG J, 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.
- [10] 贾彪, 马富裕. 基于机器视觉的棉花氮素营养诊断系统设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(3): 305 - 310.
JIA Biao, MA Fuyu. Design and experiment of cotton nitrogen nutrition diagnosis system based on machine vision[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3): 305 - 310. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160343&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.43. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] GREENWOOD D J, GASTAL F, LEMAIRE G. Growth rate and % N of field grown crops: theory and experiments[J]. *Annals of Botany*, 1991, 67(2): 181 - 190.
- [13] HUANG S Y. A new critical nitrogen dilution curve for rice nitrogen status diagnosis in northeast China[J]. *Pedosphere*, 2018, 28(5): 120 - 128.

- [14] 吕茹洁, 商庆银, 陈乐, 等. 基于临界氮浓度的水稻氮素营养诊断研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5): 1396 - 1405.
LÜ Rujie, SHANG Qingying, CHEN Le, et al. Diagnostic study of nitrogen nutrition in rice based on critical nitrogen concentration[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2018, 24(5): 1396 - 1405. (in Chinese)
- [15] ZIA D N, BELANGER G, CLAESSENS A. Determination of a critical nitrogen dilution curve for spring wheat[J]. Agronomy Journal, 2010, 102(1): 241 - 250.
- [16] 李正鹏, 冯浩, 宋明丹. 关中平原冬小麦临界氮稀释曲线和氮营养指数研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 177 - 183.
LI Zhengpeng, FENG Hao, SONG Mingdan. Study on critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition index of winter wheat in Guanzhong Plain[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 177 - 183. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151023&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.023. (in Chinese)
- [17] ILETTO C M, ECHEVERRIA H E. Critical nitrogen dilution curve for processing potato in argentinean humid pampas[J]. American Journal of Potato Research, 2012, 89(2): 102 - 110.
- [18] 马露露, 吕新, 张泽, 等. 基于临界氮浓度的滴灌棉花氮素营养诊断模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 48(2): 277 - 283.
MA Lulu, LÜ Xing, ZHANG Ze, et al. Establishment of nitrogen nutrition diagnosis model for drip irrigation cotton based on critical nitrogen concentration[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 48(2): 277 - 283. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180235&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.035. (in Chinese)
- [19] 石小虎, 蔡焕杰. 基于叶片 SPAD 估算不同水氮处理下温室番茄氮营养指数[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 124 - 134.
SHI Xiaohu, CAI Huanjie. Estimation of nitrogen nutrition index of greenhouse tomato under different water and nitrogen treatment based on leaf SPAD[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 124 - 134. (in Chinese)
- [20] 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.
LIANG Xiaogui, ZHANG Jingting, ZHOU Lili, et al. Study on critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition index of summer maize in North China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2): 292 - 299. (in Chinese)
- [21] 银敏华, 李援农, 谷晓博, 等. 氮肥运筹对夏玉米氮素盈亏与利用的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 167 - 176.
YIN Minhua, LI Yuannong, GU Xiaobo, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on nitrogen profit and loss and utilization of summer maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 167 - 176. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151022&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.022. (in Chinese)
- [22] 安志超, 黄玉芳, 汪洋, 等. 不同氮效率夏玉米临界氮浓度稀释模型与氮营养诊断[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 123 - 133.
AN Zhichao, HUANG Yufang, WANG Yang, et al. Dilution model of critical nitrogen concentration and nitrogen nutrition in summer maize with different nitrogen efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2019, 25(1): 123 - 133. (in Chinese)
- [23] ALLEN R G. Using the FAO - 56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study[J]. Journal of Hydrology, 2000, 229(1): 27 - 41.
- [24] JUSTES E, MARY B, MEYNARD J M. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops[J]. Annals of Botany, 1994, 74(4): 397 - 407.
- [25] 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.
- [26] 侯云鹏, 李前, 孔丽丽, 等. 不同缓/控释氮肥对春玉米氮素吸收利用、土壤无机氮变化及氮平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 111 - 123.
HOU Yunpeng, LI Qian, KONG Lili, et al. Effects of different slow/controlled nitrogen fertilizers on nitrogen uptake and utilization, soil inorganic nitrogen and nitrogen balance in spring maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(20): 111 - 123. (in Chinese)
- [27] WOOD A W, MUCHOW R C, ROBERTSON M J. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. III. Accumulation, partitioning and use of nitrogen[J]. Field Crops Research, 1996, 48(2 - 3): 223 - 233.
- [28] 薛晓萍, 王建国, 郭文琦, 等. 氮素水平对初花后棉株生物量、氮素累积特征及氮素利用率动态变化的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3631 - 3640.
XUE Xiaoping, WANG Jianguo, GUO Wenqi, et al. Effects of nitrogen levels on biomass, nitrogen accumulation characteristics and nitrogen use efficiency of cotton plants after initial flowering[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3631 - 3640. (in Chinese)
- [29] 张富仓, 严富来, 范兴科, 等. 滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 111 - 120.
ZHANG Fucang, YAN Fulai, FAN Xingke, et al. Effects of irrigation and fertilization levels on grain yield and water-fertilizer use efficiency of drip-fertigation spring maize in Ningxia[J]. Transactions of the CASE, 2018, 34(22): 111 - 120. (in Chinese)