

高密度种植下氮肥对玉米根系生长及氮代谢的影响

周文丽 郝淼艺 张仁和

(西北农林科技大学农学院, 712100, 陕西杨凌)

摘要 以玉米品种先玉 335 为材料, 设置常规密度处理 6.75×10^4 株/hm² (D1) 和高密度处理 8.25×10^4 株/hm² (D2), 以及 5 个施氮水平 (0、160、220、280 和 340 kg/hm²), 分析高密种植下施氮对玉米产量、根系生长分布及氮代谢的影响。结果表明, 籽粒产量随施氮量增加呈先增后减的趋势, D2 处理下产量显著高于 D1 处理, 高密度种植和优化施氮量 (160~220 kg/hm²) 的组合较常规管理增产 39.1%~51.8%。优化密氮组合可增加根长、根长密度、根表面积、根体积和比根长, 并提高根系谷氨酸合成酶和谷氨酰胺合成酶活性, 且 2 种酶活性与根系生长分布呈显著正相关。综上, 推荐种植密度为 8.25×10^4 株/hm² 时施纯氮 160~220 kg/hm², 该组合通过增强氮代谢酶活性, 促进根系生长, 增加土壤养分吸收, 进而提高玉米产量, 可作为陕西关中玉米高产种植模式。

关键词 玉米; 根系; 密度; 氮肥; 氮代谢; 产量

玉米是我国最重要的粮食作物, 对保障粮食安全至关重要^[1]。种植密度与氮肥施用是提升玉米产量的关键栽培措施, 且二者存在显著的交互作用^[2]。研究^[3]表明, 在密植条件下增施氮肥可显著提高玉米的穗粒数与粒重。根系是植物吸收水分和养分的主要器官, 其发达程度直接影响对地上部的养分供给, 为地上部物质生产提供保障^[4]。植物根系竞争是普遍存在的现象, 在植物生长过程中发挥重要作用^[5]。在玉米高产田间管理中, 密植会加剧根系间的竞争, 进而限制单株对氮的吸收^[6]。合理调整氮肥施用量可调控玉米群体根系建成, 刺激侧根生长, 最终提升玉米的生产能力与可持续性^[7]。然而, 高氮环境会抑制根系生长, Tian 等^[8]发现玉米生长在高硝酸盐浓度的环境中时, 根伸长会受到抑制。此外, 根系生长需要大量氮同化物的参与, 与氮代谢紧密相关。目前, 关于密植与氮肥互作对植物氮代谢影响的研究多集中于地上部分, 马冬云等^[9]研究发现, 高密度种植有利于增强小麦旗叶的氮同化酶活性; 孔令中等^[10]发现在超高密度 ($90\ 000$ 株/hm²) 种植条件下, 施氮量为 279 kg/hm² 时玉米叶片的硝酸还原酶 (NR) 和谷氨酰胺合成酶 (GS) 活性达到最高。但关于高密度种植下, 如何通过优化氮肥调控根系生长及氮代谢相关酶活性, 进而影响玉米籽粒产量的研究鲜见报道。

基于此, 本研究设置 2 个种植密度与 5 个施氮

量处理, 分析高密条件下施氮量与玉米根系形态、构型及生理特性之间的内在关联, 旨在探索能够同步优化根系性状、提升玉米氮素利用效率并增加籽粒产量的适宜密氮调控组合, 以期为玉米稳产丰产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于陕西杨陵玉米试验基地 (108°08' N, 34°31' E) 进行, 海拔约 500 m, 地处关中平原中部, 属大陆性季风气候。年均温 12.9 °C, 无霜期 211 d, 年日照时数 2163.8 h, 年均降水量 635.1 mm。采用双季种植模式, 前茬作物为油菜。土壤为娄土, 2021 年 0~20 cm 土壤有机质含量 7.58 g/kg、全氮 0.94 g/kg、速效氮 53.46 mg/kg、速效磷 22.52 mg/kg、速效钾 138.69 mg/kg; 2022 年相应数据为 7.15 g/kg、0.87 g/kg、49.35 mg/kg、24.14 mg/kg、440.16 mg/kg。试验期间温度和降水量数据见图 1。

1.2 试验设计

以玉米品种先玉 335 为供试材料, 设置 2 个种植密度处理: 常规密度 6.75×10^4 株/hm² (D1) 和高密度 8.25×10^4 株/hm² (D2); 5 个施氮水平处理: 0 (N0)、160 (N1)、220 (N2)、280 (N3) 和 340 (N4) kg/hm², 共 10 个处理, 3 次重复, 双因素完全随机区组设计。于 2021 年 6 月

作者简介: 周文丽, 主要从事玉米栽培生理研究, E-mail: 2022050008@nwsuaf.edu.cn

张仁和为通信作者, 主要从事玉米高产高效栽培技术研究, E-mail: zhangrenhe@nwsuaf.edu.cn

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2024NC-ZDCYL-01-04)

收稿日期: 2024-12-30; 修回日期: 2025-02-25; 网络出版日期: 2025-04-24

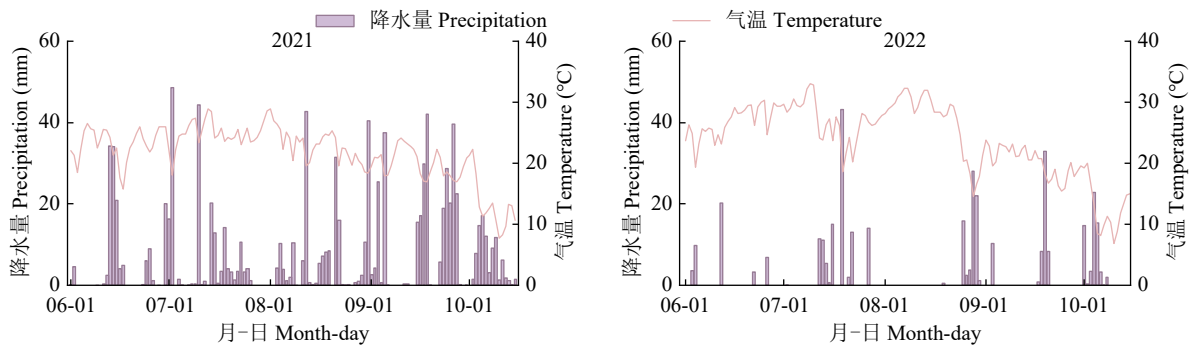


图 1 2021–2022 年玉米生育期的日均温度和日降水量变化

Fig.1 Changes of daily average temperature and precipitation during maize growth period from 2021 to 2022

8 日和 2022 年 6 月 15 日播种，种植行距 60 cm，小区面积 75 m²。氮肥分基肥与追肥以 1:1 比例施用，追肥于大喇叭口期施用，磷肥 (P₂O₅ 120 kg/hm²) 与钾肥 (K₂O 90 kg/hm²) 作基肥一次性施用。水分管理采用常规喷灌，于苗期、拔节期、花期和灌浆期各浇水 1 次，其余田间管理同大田。

1.3 测定项目与方法

于吐丝期，通过挖掘取样法对田间玉米根系进行取样。每处理随机选取 3 株生长状况一致的玉米植株，以植株为中心取出宽 28 cm、长 60 cm、深 35 cm 的土块；将取出的根系轻轻摇晃，去除附着的土壤后放入网袋中，使用适当压力的水枪对根系进行冲洗，冲洗干净后将根系的根冠部分放置在成像平面之上，获取根系的图像，使用 ImageJ 1.46 图像分析软件对图像进行处理和分析，得出根系的最大张角和最大宽度。使用植物图像分析仪 (LA-S, 杭州万深检测科技有限公司) 获得根长、根直径、根表面积、根体积以及根长密度。将地上部与根系分别装入纸袋，于烘箱中 105 °C 高温杀青 30 min，80 °C 烘干至恒重，对各部分称重，分别计算根冠比、比根长、行间与株间最大张角比、行间与株间最大宽度比，公式为：根冠比=根系干物质量/地上部干物质量；比根长=根长/根系干物质量；行间与株间最大张角比=行间最大张角/株间最大张角；行间与株间最大宽度比=行间最大宽度/株间最大宽度。

田间取根鲜样后，将样品迅速洗净放入冰盒中带回实验室，称取 0.5~1.0 g 样品充分研磨，利用试剂盒 (北京索莱宝科技有限公司) 测定酶活性，采用紫外分光光度计在 540 nm 波长下测定 NR (BC0085) 和 GS (BC0915) 活性，在 340 nm 波长下测定谷氨酸合成酶 (GOGAT, BC0070) 活性。

于玉米成熟期，调查每个小区的成株穗数，

收获中间 3 行，收获后自然风干，每处理选取 10 个样穗调查穗粒数和百粒重，脱粒后计算出籽率，出籽率 (%) = 籽粒重/穗重 × 100。使用谷物水分测定仪 (PM-8188, KETT, 日本) 测定籽粒含水量，计算籽粒产量。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019 软件整理数据，用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行数据分析，用 LSD 法 ($P < 0.05$) 检验显著性，并进行 Pearson 相关性分析，用 Origin 2025 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同密度和氮肥处理的产量及其构成要素

由表 1 可知，高密处理 (D2) 的玉米籽粒产量均明显增加，N0~N4 氮肥处理 2 年平均增幅分别为 33.8%、20.7%、10.6%、19.2% 和 4.3%。籽粒产量随施氮量增加呈先增后降趋势。与不施氮处理 (N0) 相比，D1 密度下，N1~N4 处理 2 年度平均增幅分别为 21.0%、31.9%、9.6% 和 12.1%；D2 密度下，N1 和 N2 处理 2 年度平均增幅分别为 8.7% 和 9.1%，N3 和 N4 处理则分别降低了 2.9% 和 13.1%。增密通过增加穗数获得高产，施氮量在 2022 年对穗粒数产生极显著影响，随着施氮量增加穗粒数亦呈先增后降的趋势。2021 年 D1 密度下以 N2 处理产量最高，D2 密度下以 N1 处理产量最高；2022 年在 D1 和 D2 密度下均以 N2 处理产量最高。总体来看，高密度配合施氮 160~220 kg/hm² 可获得较高产量。

2.2 不同密度和氮肥处理的玉米根系形态

2021 年密度与氮肥对所有根系形态指标均有显著影响，且存在显著交互效应，2022 年密度对根体积、根冠比和比根长影响不显著 (图 2)。2021 年 D2 密度处理显著增加了玉米根表面积、根体积、

表 1 2021~2022 年不同密度和氮肥处理对玉米产量及其构成因素的影响
Table 1 Effects of sowing density and nitrogen application on the grain yield of maize from 2021 to 2022

年份 Year	密度处理 Density treatment	氮肥处理 N treatment (kg/hm ²)	穗数 Ear number (×10 ⁴ plants/hm ²)	穗粒数 Kernel number per ear	百粒重 100-grain weight (g)	出籽率 Kernel percentage (%)	籽粒产量 Grain yield (×10 ⁴ kg/hm ²)	
2021	D1	N0	6.72c	470.08a	31.05c	0.79bc	0.78c	
		N1	6.78c	476.95a	35.40bc	0.82ab	0.94abc	
		N2	6.56c	539.09a	39.89ab	0.76c	1.07ab	
		N3	6.17c	496.80a	36.09bc	0.82ab	0.90bc	
		N4	6.22c	517.39a	32.86c	0.80ab	0.84b	
	D2	N0	7.17ab	486.21a	38.27ab	0.82ab	1.09a	
		N1	7.50a	552.21a	40.39a	0.82ab	1.25a	
		N2	5.94c	502.00a	37.44abc	0.84a	1.03abc	
		N3	6.39c	491.84a	37.07abc	0.81ab	0.95abc	
		N4	7.22ab	476.35a	33.59bc	0.80ab	0.93bc	
	F 值 F value	密度	*	ns	*	*	**	
		施氮量	*	ns	*	ns	**	
		密度×施氮量	ns	ns	ns	*	ns	
	2022	D1	N0	5.87bc	404.57de	33.76ab	0.70ab	0.79c
N1			5.60c	484.40bc	35.39a	0.79ab	0.96bc	
N2			5.92bc	488.17bc	34.83ab	0.78ab	1.00bc	
N3			5.17c	460.60bcd	34.96ab	0.74ab	0.82c	
N4			5.87bc	441.20cde	35.38a	0.71ab	0.92bc	
D2		N0	7.57a	399.27e	33.90ab	0.77ab	1.01abc	
		N1	6.99a	423.21de	35.37a	0.82a	1.04abc	
		N2	7.47a	501.50a	33.64ab	0.75ab	1.25a	
		N3	6.88ab	480.77bc	33.04ab	0.65b	1.09ab	
		N4	7.31a	398.90e	30.80b	0.80ab	0.90bc	
F 值 F value		密度	**	ns	ns	*	*	
		施氮量	ns	**	ns	ns	*	
		密度×施氮量	ns	*	ns	*	ns	

不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。“*”和“**”分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上存在显著或极显著影响，“ns”表示影响不显著。下同。

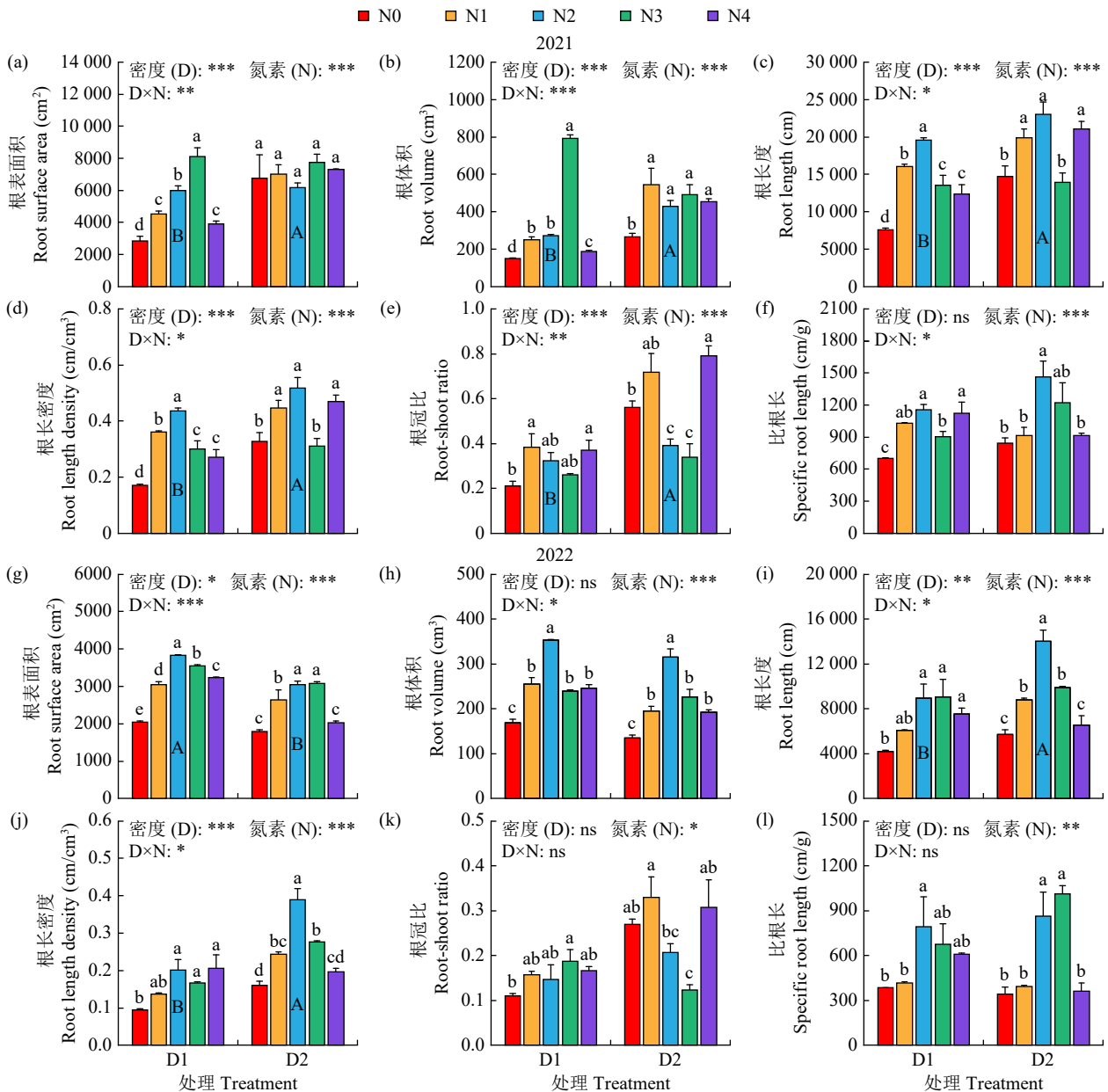
Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$). “*” and “**” indicate the effect is significant or extremely significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively, “ns” indicates the effect is not significant. The same below.

根长、根长密度以及根冠比, N1~N4 处理下各指标较 D1 密度分别提高了 3.1%~138.3%、58.0%~118.2%、2.9%~94.9%和 3.3%~92.2%, 但在 2022 年, 根表面积在 D1 密度下较 D2 密度高 13.9%~59.4%。在 D1 密度下, 根表面积、根体积、根长和根长密度均随施氮量增加呈先增后降趋势, 在 N2 或 N3 处理下达最大值, 这与产量的变化趋势一致, 但在 D2 密度下趋势不明显。施氮处理的根系生长均优于不施氮处理, 其中施氮处理的根表面积、根体积、根长和根长密度分别提高了 3.6%~185.1%、24.5%~105.1%、35.2%~158.7%和 36.7%~156.9%。D2 密度下, 2 年的根冠比均于 N2 处理开始下降, 于 N4 处理显著升高, 与 N3 处理相比 2021 年和 2022 年分别升高了 132.4%和 148.7%。在 N0、N1 和 N4 处理下, D2 密度明显提高了玉米的根冠比, 2021 年增幅分别为 166.7%、87.0%和 113.5%, 2022 年增幅分别为 145.5%、110.6%和

84.0%。比根长在 N2 和 N3 处理下最高, 且显著高于其他施氮量, 较最低的 N0 处理在 2021 年提高了 45.2%~73.5%, 在 2022 年提高了 75.9%~195.6%。增加种植密度并合理施氮可以促进根系生长, 其中 D2N2 组合相对较佳。

2.3 不同密度和氮肥处理的玉米根系构型

密度和氮肥均显著影响玉米的根系构型, 且二者有显著交互作用 (图 3)。当种植密度增加时, 玉米根系行间张角、株间张角、行间最大宽度以及行间与株间最大宽度比均显著提高, 提高幅度分别为 8.9%~56.2% (除 2021 年 N2 和 N3 处理分别降低 4.2%和 9.0%)、15.1%~42.4% (除 2022 年 N1 处理降低 1.2%)、5.9%~46.3%、3.3%~68.7% (除 2021 年 N0 处理降低 3.1%、2022 年 N4 处理降低 26.6%)。2021 年, 随着种植密度增加, 根系株间最大宽度、行间与株间最大张角比显著降低, 降低幅度分别为 7.1%~32.1% (除 N0 处理升高 33.9%)



不同大写字母表示不同种植密度处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一密度下不同施氮量处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。 “*”、“**”和“***”分别表示在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 水平上存在显著影响, “ns”表示影响不显著。下同。

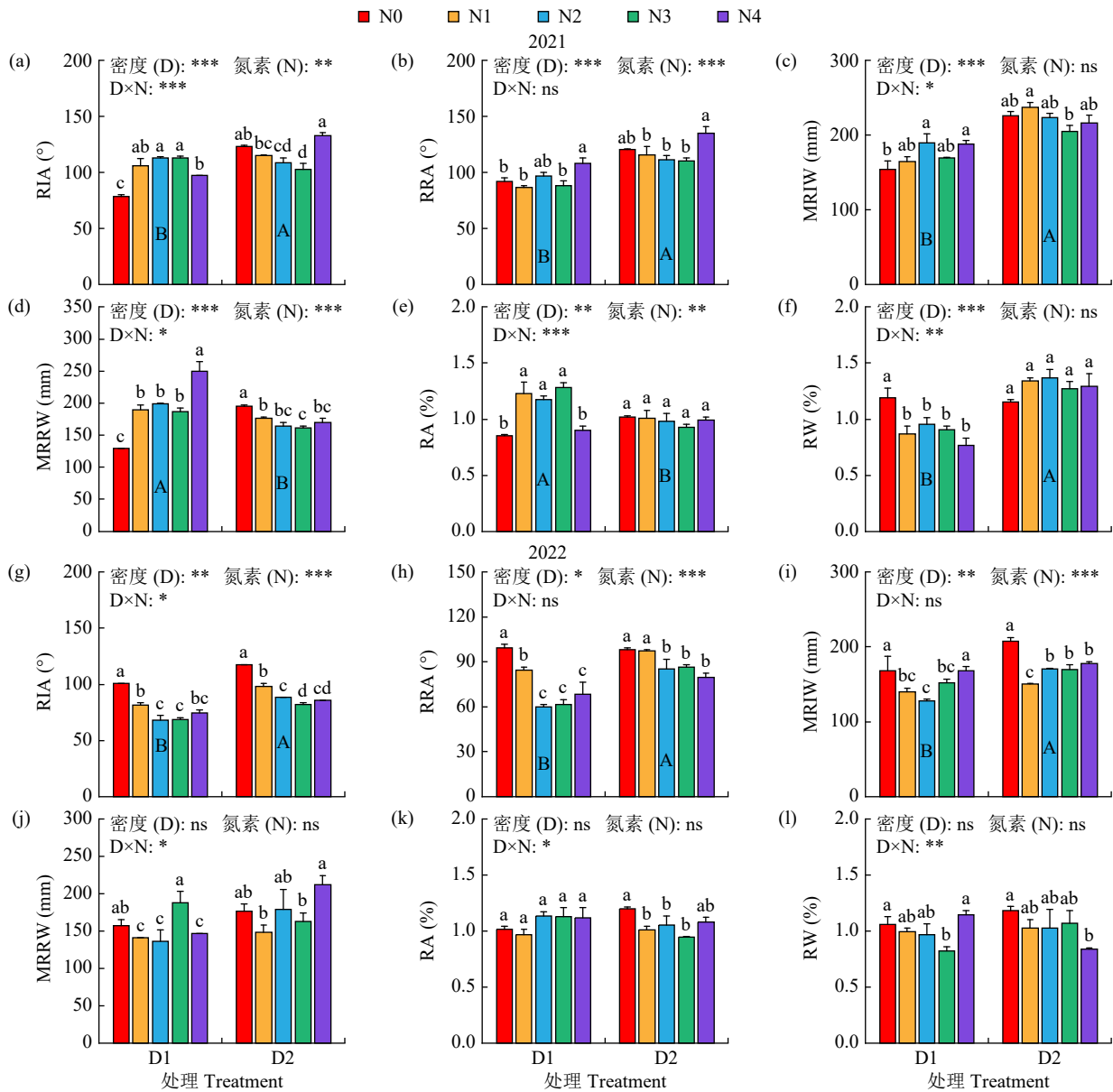
Different capital letters indicate significant differences among different planting density treatments ($P < 0.05$), different lowercase letters indicate significant differences among different nitrogen fertilizer treatments under the same density ($P < 0.05$). “*”, “**” and “***” indicate the effect is significant at $P < 0.05$, $P < 0.01$ and $P < 0.001$ levels, respectively, “ns” indicates the effect is not significant. The same below.

图2 2021–2022年不同密度和氮肥处理对玉米根系形态的影响

Fig.2 Effects of different densities and nitrogen fertilizer treatments on root morphology of maize from 2021 to 2022

和 16.5%~27.8% (除 N0 和 N4 处理分别升高 19.5% 和 9.6%)。2021 年, 在 D1 密度下, 施氮处理显著提高根系行间张角、行间和株间最大宽度以及行间与株间最大张角比; 2022 年, 除根系株间最大宽度以及行间与株间最大张角比在部分施氮处理下有所提高外, 各根系构型指标在施氮处理下均降低, 密度与氮肥对玉米根系株间最大宽度、行间与株间最大张角比和宽度比的影响不显著; 比较 2 年

之间的差异可得, 除 N0 处理外, 2021 年根系行间张角、株间张角和行间最大宽度较 2022 年分别提高了 4.5%~39.6%、2.3%~41.0% 和 8.0%~32.5%, 这可能是 2022 年高温干旱天气导致降水量减少, 生长季节最高温度升高, 多达 18 d 温度超过 30 °C (图 1)。增加种植密度促进玉米根系在行间延伸, 更多地利用行间土壤空间, 而施氮对玉米根系构型作用较小。



RIA: 根系行间张角; RRA: 根系株间张角; MRIW: 根系行间最大宽度; MRRW: 根系株间最大宽度; RA: 根系行间与株间最大张角比; RW: 根系行间与株间最大宽度比; RSA: 根表面积; RV: 根体积; RL: 根长; RLD: 根长密度; SRL: 比根长; RSR: 根冠比。
 RIA: root inter-row angle; RRA: root intra-row angle; MRIW: maximum root inter-row width; MRRW: maximum root intra-row width; RA: ratio of maximum root inter-row to intra-row angle; RW: ratio of maximum root inter-row to intra-row width; RSA: root surface area; RV: root volume; RL: root length; RLD: root length density; SRL: specific root length; RSR: root-shoot ratio.

图 3 2021-2022 年不同密度和氮肥处理对玉米根系构型的影响

Fig.3 Effects of different densities and nitrogen fertilizer treatments on maize root architecture from 2021 to 2022

2.4 不同密度和氮肥处理的玉米根系氮代谢相关酶活性

2 年间密度对 NR 活性有显著影响; 2021 年, 不同种植密度对 GOGAT 活性影响不显著, 对 GS 活性影响显著; 2022 年, 各氮肥处理对 3 种氮代谢相关酶活性的影响均显著 (图 4)。2021 年, 施氮量和种植密度对 3 种酶活性有显著交互作用。相同种植密度下, 3 种酶活性随施氮量增加均呈先升后降的趋势。2022 年, NR 活性在不同密度下均在

N2 处理达最大值。2021 年在 N1 处理下, 增加种植密度使得 NR 活性增加, D2 密度较 D1 密度高 31.5%, 其他处理下 NR 活性则随密度增加显著降低。GS 活性随施氮量增加呈先增后降的趋势, 2021 年 D2 密度高于 D1 密度, 于 N1 处理下增幅最大, 并随施氮量增加增幅逐渐减小。GOGAT 活性随施氮量变化的趋势与 GS 活性相似, 2021 年分别在 D1N2 和 D2N1 处理下达最大值。在 N1 处理下, 提高种植密度使得 GOGAT 活性提升 47.6%, 但在

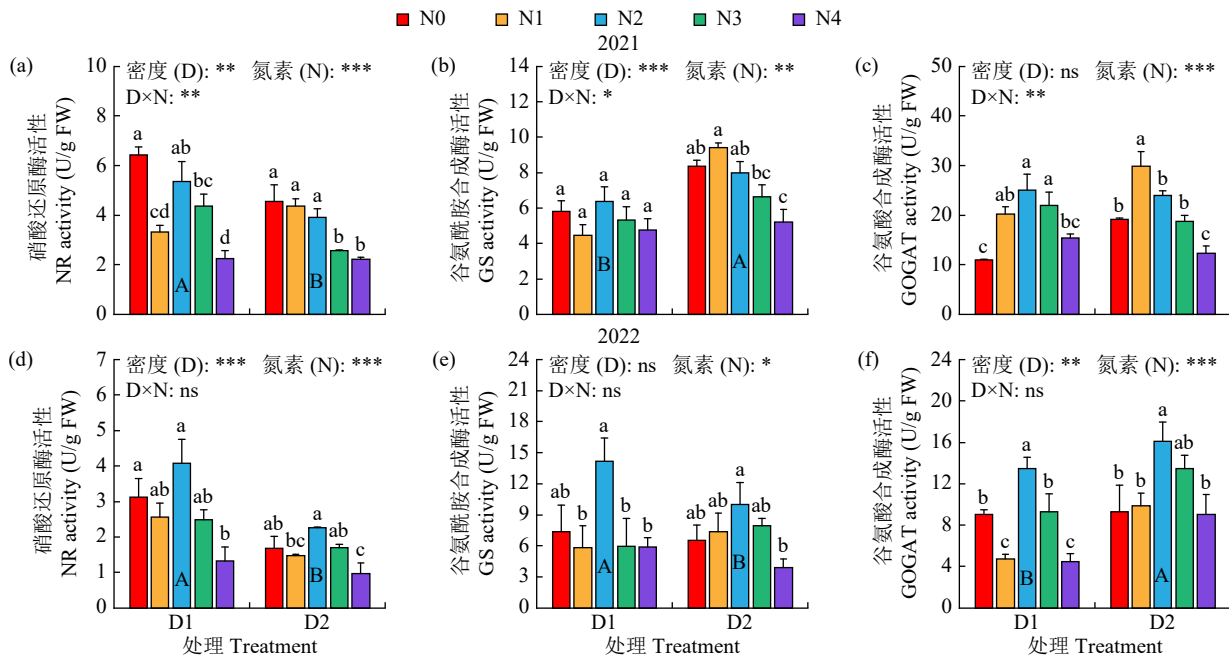


图 4 2021-2022 年不同密度和氮肥处理对玉米根系氮代谢酶活性的影响
 Fig.4 Effects of different densities and nitrogen fertilizer treatments on nitrogen metabolism enzyme activities in maize roots from 2021 to 2022

N2 处理下活性降低 4.5%。增加种植密度虽然使 NR 活性有所降低，但提高了 GS 与 GOGAT 的活性；随着施氮量增加，氮代谢相关酶活性呈抛物线形变化规律，在 N1 和 N2 处理下表现最佳，有利于根系氮同化。

2.5 玉米产量与根系生长和生理特性的相关性

玉米产量与根系行间最大宽度、根长、根长密度、根冠比以及 GS、GOGAT 活性呈显著正相关（表 2）。在根系氮代谢酶活性之间比较，GOGAT 与 NR 活性之间存在显著正相关关系。根系各生长

表 2 产量、根系生物学特性以及生理指标的相关性分析
 Table 2 Correlation analysis of yield, root biological characteristics and physiological indexes

指标 Index	RIA	RRA	MRIW	MRRW	RA	RW	RSA	RV	RL	RLD	SRL	RSR	NR	GS	GOGAT	GY
RIA	1.000															
RRA	0.809**	1.000														
MRIW	0.708**	0.734**	1.000													
MRRW	0.295*	0.194	0.306*	1.000												
RA	0.148	-0.452**	-0.127	0.121	1.000											
RW	0.330*	0.473**	0.609**	-0.551**	-0.261*	1.000										
RSA	0.582**	0.506**	0.529**	0.136	0.063	0.325*	1.000									
RV	0.372**	0.212	0.270*	0.006	0.236	0.209	0.806**	1.000								
RL	0.600**	0.547**	0.596**	0.212	0.029	0.340**	0.767**	0.560**	1.000							
RLD	0.583**	0.528**	0.591**	0.193	0.028	0.359**	0.692**	0.524**	0.969**	1.000						
SRL	0.290*	0.319*	0.358**	0.209	-0.069	0.161	0.637**	0.460**	0.803**	0.761**	1.000					
RSR	0.690**	0.704**	0.681**	0.267*	-0.113	0.362**	0.600**	0.360**	0.657**	0.627**	0.266*	1.000				
NR	0.163	0.157	0.075	-0.122	-0.030	0.153	0.410**	0.242	0.323*	0.233	0.312*	0.122	1.000			
GS	-0.105	-0.095	0.008	-0.203	0.002	0.175	0.028	0.124	0.087	0.125	0.153	-0.088	0.064	1.000		
GOGAT	0.485**	0.368**	0.504**	0.287*	0.127	0.191	0.676**	0.563**	0.741**	0.718**	0.655**	0.521**	0.498**	0.142	1.000	
GY	0.198	0.183	0.331**	0.053	-0.007	0.221	0.163	0.177	0.356**	0.425**	0.142	0.274*	-0.005	0.348**	0.395**	1.000

RIA: 根系行间张角; RRA: 根系株间张角; MRIW: 根系行间最大宽度; MRRW: 根系株间最大宽度; RA: 根系行间与株间最大张角比; RW: 根系行间与株间最大宽度比; RSA: 根表面积; RV: 根体积; RL: 根长; RLD: 根长密度; SRL: 比根长; RSR: 根冠比; NR: NR 活性; GS: GS 活性; GOGAT: GOGAT 活性; GY: 籽粒产量。“*”和“**”分别表示显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$) 相关。RIA: root inter-row angle; RRA: root intra-row angle; MRIW: maximum root inter-row width; MRRW: maximum root intra-row width; RA: ratio of maximum root inter-row to intra-row angle; RW: ratio of maximum root inter-row to intra-row width; RSA: root surface area; RV: root volume; RL: root length; RLD: root length density; SRL: specific root length; RSR: root-shoot ratio; NR: NR activity; GS: GS activity; GOGAT: GOGAT activity; GY: grain yield. “*” and “**” indicate significant ($P < 0.05$) and extremely significant ($P < 0.01$) correlations, respectively.

指标之间存在显著的相关性，其中根系行间与株间张角、行间与株间最大宽度存在显著正相关关系，说明玉米根系行间与株间的生长存在同伸关系。根表面积、根体积、根长、根长密度、比根长均与根系行间张角、株间张角、行间最大宽度呈显著正相关，说明玉米根系构型会影响根系生长，增加行间分布有利于根系生长。氮代谢酶活性与根系生长、分布存在显著相关性，NR 活性与根表面积、根长、比根长呈显著正相关；GOGAT 活性与根系行间张角、株间张角、行间最大宽度、株间最大宽度、根系表面积、体积、总根长、根长密度、比根长、根冠比均存在显著正相关关系；但 GS 活性与根系生长各指标之间无显著相关关系。

3 讨论

通过增加玉米种植密度并适度施用氮肥，可有效提升产量^[11]；但过量施用氮肥会降低籽粒库容，导致减产^[12]。因此，优化种植密度与氮肥施用量的配置尤为重要^[13-15]。本研究中，提高种植密度能够显著增加有效穗数与籽粒产量；施氮条件下，玉米产量构成要素相比不施氮处理均有所增加，但随着施氮量继续增加，产量呈下降趋势。高密度种植条件下，氮肥对产量的影响主要通过增加穗粒数实现，这与王宏庭等^[16]研究结果一致。在 D2 密度下，2021 年施氮量为 160 kg/hm² 时籽粒产量最高，2022 年，相应施氮量则为 220 kg/hm²。综合 2 年试验结果，高密种植下推荐施氮量范围为 160~220 kg/hm²。

发达的根系能够显著提高植物对土壤中氮素的吸收能力^[17]。根系的大小决定了植物对氮的吸收程度，根系越长则根表面积越大，植物吸收的氮素越多^[18]。随着种植密度增加，植物的根系生物量和活跃吸收面积往往会减少^[19]。合理施用氮肥可显著提升根系各项指标，但过量施氮（ ≥ 240 kg/hm²）会使提升效果下降^[20]。本试验中，施氮显著提高玉米根表面积、根体积、根长和根长密度，根系在土壤中的分布范围与密度均变大，从而更充分地利用土壤空间吸收养分，但继续增施氮肥（ > 220 kg/hm²）会使根系生长受到抑制。密植玉米的根表面积、根体积、根长和根长密度显著增加，这与前人^[21]研究结果不同，可能是受到土壤类型和氮肥施用等因素的影响，玉米因养分竞争致使单株根系增大。此外，密植玉米的根系行间与株间张角均

增加，行间张角增幅更大；行间与株间最大宽度增加，株间宽度增幅更大；其单株根系向行间和株间进一步扩张，但受到种植密度的影响，侧根形成主要发生在行间，与前人^[22]研究结果一致。施氮处理下，根系张角与宽度有所降低，可能是施氮缓解了株间竞争，提高了比根长，在 N2 和 N3 处理下达到最大，比根长增大有利于植株更有效地利用资源，提高氮吸收，这一结果与前人^[23]研究相似。

玉米根系对土壤氮素的吸收利用与根系氮代谢酶活性密切相关。NR 以及 GS/GOGAT 循环可将根系吸收的无机氮转化为有机氮，在氮同化及作物最终氮素利用过程中发挥重要作用^[24]。本研究结果表明，与常规种植密度相比，高密种植下根系 NR 活性降低，而 GS 与 GOGAT 活性升高；施用氮肥后，3 种氮代谢酶活性均上升，随着施氮量增加到 220 kg/hm² 以上，酶活性的增幅减小，甚至低于不施氮处理，这与前人^[25]研究结果相似。此外，研究^[26]发现 NR 通过诱导侧根形成和无机氮吸收来提高水稻吸氮能力，本研究中 NR 活性与根系生长呈显著正相关；GOGAT 活性与根系张角、最大宽度以及各形态指标均存在显著正相关关系，说明根系氮代谢酶活性影响根系生长与构型，进而影响根系氮吸收。

4 结论

2 年田间试验结果表明，玉米在密植（82 500 株/hm²）条件下施氮 160~220 kg/hm² 时产量最高，达 1.25×10^4 kg/hm²，其主要原因是玉米根表面积、根体积、根长、根长密度以及比根长等根系生长指标得到显著改善，增强了根系氮代谢酶活性，从而促进根系对土壤氮素的吸收，实现丰产增效。

参考文献

- [1] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 等. 中国玉米栽培研究进展与展望. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941-1959.
- [2] 李广浩, 刘娟, 董树亭, 等. 密植与氮肥用量对不同耐密型夏玉米品种产量及氮素利用效率的影响. 中国农业科学, 2017, 50(12): 2247-2258.
- [3] 冯波, 刘开昌. 密植条件下氮肥对不同品种夏玉米氮效率及光合作用的影响. 山东农业科学, 2018, 50(5): 76-80, 86.
- [4] De Kroon H, Mommer L, Nishiwaki A. Root Ecology. Berlin: Springer, 2003.
- [5] Li H B, Wang X, Brooker R W, et al. Root competition resulting from spatial variation in nutrient distribution elicits decreasing maize yield at high planting density. Plant and Soil, 2019, 439 (1/2): 219-232.
- [6] Garnett T, Conn V, Kaiser B N. Root based approaches to

- improving nitrogen use efficiency in plants. *Plant, Cell & Environment*, 2009, 32(9): 1272-1283.
- [7] Walch-Liu P I A, Ivanov I I, Filleur S, et al. Nitrogen regulation of root branching. *Annals of Botany*, 2006, 97(5): 875-881.
- [8] Tian Q Y, Chen F J, Liu J X, et al. Inhibition of maize root growth by high nitrate supply is correlated with reduced IAA levels in roots. *Journal of Plant Physiology*, 2008, 165(9): 942-951.
- [9] 马冬云, 郭天财, 查菲娜, 等. 种植密度对两种穗型冬小麦旗叶氮代谢酶活性及籽粒蛋白质含量的影响. *作物学报*, 2007, 33(3): 514-517.
- [10] 孔令中, 孟瑶, 顾万荣, 等. 东北超高密度种植下氮肥对春玉米光合、氮代谢及产量的影响. *西南农业学报*, 2015, 28(3): 1020-1026.
- [11] 王楷, 王克如, 王永宏, 等. 密度对玉米产量 (>15000 kg/hm²) 及其产量构成因子的影响. *中国农业科学*, 2012, 45(16): 3437-3445.
- [12] 丁民伟, 杜雄, 刘梦星, 等. 氮素运筹对夏玉米产量形成与氮素利用效果的影响. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1100-1107.
- [13] 盛耀辉, 王庆祥, 齐华, 等. 种植密度和氮肥水平对春玉米产量及氮素效率的影响. *作物杂志*, 2010(6): 58-61.
- [14] Xue J, Gou L, Zhao Y S, et al. Effects of light intensity within the canopy on maize lodging. *Field Crops Research*, 2016, 188: 133-141.
- [15] 春亮, 陈范骏, 张福锁, 等. 不同氮效率玉米杂交种的根系生长、氮素吸收与产量形成. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(5): 615-619.
- [16] 王宏庭, 王斌, 赵萍萍, 等. 种植方式、密度、施肥量对玉米产量和肥料利用率的影响. *玉米科学*, 2009, 17(5): 104-107.
- [17] Rogers E D, Benfey P N. Regulation of plant root system architecture: implications for crop advancement. *Current Opinion in Biotechnology*, 2015, 32: 93-98.
- [18] Sattelmacher B, Klotz F, Marschner H. Influence of the nitrogen level on root growth and morphology of two potato varieties differing in nitrogen acquisition. *Plant and Soil*, 1990, 123(2): 131-137.
- [19] 石德杨, 李艳红, 夏德军, 等. 种植密度对夏玉米根系特性及氮肥吸收的影响. *中国农业科学*, 2017, 50(11): 2006-2017.
- [20] 银敏华, 李援农, 李昊, 等. 氮肥运筹对夏玉米根系生长与氮素利用的影响. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 129-138.
- [21] 严云, 廖成松, 张福锁, 等. 密植条件下玉米冠根生长抑制的因果关系. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 257-265.
- [22] Shao H, Shi D F, Shi W J, et al. Genotypic difference in the plasticity of root system architecture of field-grown maize in response to plant density. *Plant and Soil*, 2019, 439(1/2): 201-217.
- [23] 王雁南, 杜峰, 隋媛媛, 等. 黄土丘陵区撂荒群落演替序列种根系对氮素施肥方式和水平的形态响应. *生态学报*, 2017, 37(9): 2913-2925.
- [24] Liu X J, Hu B, Chu C C. Nitrogen assimilation in plants: current status and future prospects. *Journal of Genetics and Genomics*, 2022, 49(5): 394-404.
- [25] 费聪, 张开祥, 马宏秀, 等. 有机肥配施氮肥对玉米根系生长、氮素利用及产量和品质的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(5): 26-34.
- [26] Sun H W, Li J, Song W J, et al. Nitric oxide generated by nitrate reductase increases nitrogen uptake capacity by inducing lateral root formation and inorganic nitrogen uptake under partial nitrate nutrition in rice. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(9): 2449-2459.

Effects of Nitrogen Fertilizer on Maize Root Growth and Nitrogen Metabolism under High-Density Planting

Zhou Wenli, Hao Miaoyi, Zhang Renhe

(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract The effects of nitrogen (N) application on maize yield, root distribution, and N metabolism were analyzed under high-density planting by using the maize cultivar Xianyu 335 as material, setting up a conventional density treatment of 6.75×10^4 plants/ha (D1) and a high-density treatment of 8.25×10^4 plants/ha (D2), and applying N at five rates (0, 160, 220, 280, and 340 kg N/ha) per density treatment. The results indicated that with the increasing of N application rate, the maize yield showed a trend of increasing and then decreasing. The yield of D2 treatment was significantly higher than that of D1 treatment and the combination of high-density planting and optimized N application (160-220 kg N/ha) increased the yield by 39.1%-51.8% compared to conventional management. The optimized combination of N rates and planting densities increased root length, root length density, root surface area, root volume, specific root length, as well as the activities of glutamate synthase and glutamine synthetase in roots. The two enzyme activities were positively correlated with root growth distribution. In conclusion, an application of 160-220 kg/ha of N at a planting density of 8.25×10^4 plants/ha is recommended. This combination enhances nitrogen metabolism enzyme activities, promotes root growth, and increases soil nutrient uptake, thereby improving maize yield. This can serve as a high-yield maize planting model for the Guanzhong region of Shaanxi.

Key words Maize; Root system; Density; Nitrogen fertilizer; Nitrogen metabolism; Yield