

氮高效玉米根系构型及吸收特性的研究进展

陈静¹, 马钦², 崔文芳^{1*}, 秦德志¹, 王利平¹

(1. 内蒙古农业大学, 呼和浩特 014109; 2. 呼和浩特市科技成果推广中心, 呼和浩特 010020)

摘要:从氮素吸收效率与利用效率角度, 比较不同氮效率玉米根系特征差异, 探讨玉米根系构型、土壤中空间分布与氮效率关系。根系构型、吸收功能及在土壤中空间分布与玉米氮效率密切相关。对氮高效玉米根系与氮素吸收的关系, 氮高效玉米根系构型的特征及在土壤中的空间分布等进行阐述, 表明氮高效玉米根系发达, 吸收功能具有优势, 且空间分布合理, 在土壤深层分布较多, 高活力持续期长, 有利于延长功能叶片光合功能期, 利于提高氮素吸收和利用效率。

关键词:玉米; 根系构型; 吸收特性

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2022)03-0055-04

Research Progress on Root Structure and Absorption Characteristics of Nitrogen Efficient Maize

CHEN Jing¹, MA Qin², CUI Wenfang^{1*}, QIN Dezhi¹, WANG Liping¹

(1. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 014109; 2. Hohhot Scientific and Technological Achievements Promotion Center, Hohhot 010020, China)

Abstract: Comparing the difference of root system characteristics of nitrogen absorption and utilization capacity of maize, the relationship between root system characteristics of maize and nitrogen absorption and utilization was proved, which was of great significance to the efficient utilization of nitrogen resources of maize. The root structure, absorption function and spatial distribution in soil are closely related to nitrogen efficiency of maize plants. On the relationship between the nitrogen efficient maize root and N uptake, nitrogen efficiency characteristics of maize root system configuration and conformation in the soil and the space distribution showed that the nitrogen efficiency maize varieties developed root system, absorb a function more advantages. The spatial distribution is reasonable, in the deep soil distribution, high activity duration is long, which is conducive to extend the function of leaf photosynthetic function, to improve the efficiency of nitrogen absorption and utilization.

Key words: Maize; Root system configuration; Absorption characteristics

根系发达程度、吸收能力、时空分布特征与植株整体吸收功能密切相关。不同氮效率基因型玉米根系面积、体积、活性、功能及空间分布差异较大, 研究氮高效基因型玉米根系特征与氮素吸收能力的相互关系, 对于氮高效玉米选育具有重要应用价值。目前关于玉米氮效率已有较多研究, 包括不同基因型玉米氮效率、不同氮素施用量、施用方式与施用时期、不同根系构型、不同耕作方式等对氮吸收效率、利用效率的影响, 对于氮高效玉米氮积累与利用、生理特性、根系构型及

时空分布特征也有较多研究。地下部分吸收能力强弱及氮积累能力是植株氮效率高低的基礎, 最终将决定玉米氮素吸收效率和利用效率。但根系构型及其空间分布特征与植株氮效率的关系仍不明确。因此, 就国内外有关氮高效玉米根系构型、空间分布特征、影响因素及氮效率的提升等方面进行探讨, 旨在为培育高产高效玉米奠定理论基础。

1 氮高效玉米根系分布特征及与氮效率关系

1.1 氮高效玉米根系与氮效率关系

玉米基因型不同或供氮量不同, 氮素吸收效率和利用效率也有明显差异。氮高效基因型具有较高的根系生物量、较强的根系活力、较大的根

收稿日期: 2019-12-26

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目(2018MS03011)

作者简介: 陈静(1978-), 女, 讲师, 主要从事作物高产栽培研究。

通讯作者: 崔文芳, 女, 硕士, 教授, E-mail: cui.wenfang@163.com

系总吸收面积和活跃吸收面积,这些指标能提高根系吸收能力。根系吸收、积累、转运与分配能力高,若配有适宜的根冠比与空间分布,即可进一步促进植株对氮素高效吸收和利用。根系体积与表面积大小与氮吸收效率和氮效率密切相关,正常供氮和低氮水平下,吐丝期根系投影面积与氮吸收效率呈显著正相关。氮高效玉米花前能够建立空间分布合理构型良好根系,保证根系对氮素吸收与积累,最终实现高产高效。

根系对氮吸收能力还取决于各生育时期根系形态与生理功能。氮高效吸收基因型通常具有较大的根冠比、根系总吸收面积和活跃吸收面积。研究表明,根系长度、根体积能直接影响氮吸收效率,是不同基因型氮吸收能力差异的主要原因^[1]。植株氮积累量与根系密切相关^[2-3]。一般氮高效玉米能建成较发达根系^[4],且体内氮素再循环与再利用能力较强,积累的氮素向根系再分配的比例较高^[5]。缺氮时可依靠扩大根系伸长生长和向周围伸展,最大程度吸收氮素^[6]。氮供应充足时,高产品种植株易形成较长根系和较大根表面积,进一步增加氮素积累,有效减少氮素在深层土壤无效累积和浪费。

玉米根系活跃吸收区域吸收特征及分布一般规律为起初依靠初生根吸收水分和养分,次生根形成后,初生根生理活性开始逐渐减弱。拔节前后最活跃吸收区域集中在10 cm土层中,其次是20 cm;吐丝前后活跃区域显著下移,以20 cm土层最活跃,其次为10 cm;乳熟期活跃区域继续下移,以40 cm土层最活跃,10 cm处最弱。生育后期根系活跃吸收区域下移至30~40 cm。马存金等^[7]认为,氮高效玉米植株氮积累量与根长分布密度、根系干重、活跃吸收面积等具有显著相关性,且氮高效品种花前根系形态、分布特征、吸收能力对氮响应度较高,花后响应度较低。因此,生产实践中对于氮高效品种可适度控制花前施氮量,适量增加花后施氮量,促进根系合理分布,并增强吸收功能,有助于进一步提高氮吸收和积累。程乙等^[8]研究表明,发达的根系能够保证植株对氮素的吸收,使植株具有较高氮素转运效率、贡献率和氮素利用效率。

综上所述,氮高效玉米品种因具有发达根系、根系吸收活力强、较大的总吸收面积和活跃吸收面积,能有效促进氮的吸收和积累,是氮高效的基础;玉米植株较强的氮素转运与氮籽粒分配能力,促进氮高效利用,是氮高效的关键。氮低效

玉米氮素吸收能力不足或虽具有较强的氮素吸收能力,但其生育后期功能叶片和根系衰老速度快,氮素转运与分配能力显著下降,会明显影响植株对氮素的合理利用和高效利用,不利于氮效率提高^[9]。

1.2 氮高效玉米根系构型特征

根系构型是根系在土壤空间中组织结构和空间分布,决定植物吸收水分和养分能力。根系几何构型是指根系在时间和空间上的分布层次;根系拓扑结构是指根系犹如一个网络,是根系系统骨架;单独某段根系特征属性,如部分根系直径、表面颜色和是否存在根毛。具体包括根系形态与分布层次、根系拓扑结构、根长密度、根系伸长速率、各级根的发生及空间三维分布、根系生长角度和根系扭转程度等。理想的根系构型能够从资源有限的土壤环境中更高效地吸收氮素、防止氮素淋洗。根系构型是否合理在一定程度上影响氮吸收效率,二者间存在显著相关性,节根数、节根长度与氮吸收效率相关性较显著。

氮高效玉米典型特征之一是拥有强大根系,根系较大且分布较深,氮吸收能力及利用效率更高^[10],根系长度、根系体积及根系分布深度对氮吸收效率影响最大,是导致氮吸收效率差异的主要原因^[11],具有少量长侧根基因型更有优势,吸氮能力更强,尤其是供氮不足时,长侧根更能够发挥优势,显著提高根系吸氮能力。适宜数目的节根和侧根利于供氮不足时吸收氮素,深层根系可更有效吸收深层氮素。

缺氮时氮高效基因型可有效增加总根长、根表面积和吸收面积来提高氮吸收能力,反之通过加强侧根伸长来增加根系表面积和吸收面积来提高氮吸收能力^[12]。花后根系持续稳定的吸收功能也是氮高效的一个重要原因。吐丝后,氮低效品种根系衰老速率显著快于氮高效品种,氮素不足时表现尤为明显,此时根长具有优势的氮高效品种仍能稳定吸收深层土壤中氮素;供氮充足,氮高效品种根系衰老更为缓慢,根系较大的氮吸收速率使其氮素吸收量依然较高,最终表现为产量和氮效率高于氮低效品种。氮高效玉米氮积累量高的主要原因是其根系总量较多,深层土壤根系分布相对较多,且空间分布合理,活力较强且功能稳定期长;促使籽粒产量高、氮效率高的另一个重要原因是籽粒库容大,可发挥自我调节能力,提高氮素转运效率,增大向籽粒分配比例^[13]。

吸收效率高的玉米品种通过改变根系的形态

特征和生理特性提高氮吸收能力。根系吸收能力强弱取决于根系生物量、生理特性及空间分布^[14-15]。随产量提高,根系分布呈“横向紧缩、纵向延伸”变化趋势^[16]。供氮不足促进根系向纵向伸长生长,供氮充足会反馈抑制主根发育而促进侧根生长^[17],说明供氮水平高低能调控根系的生长发育。

1.3 氮高效玉米根系对硝态氮和铵态氮吸收特性

氮高效玉米基因型对 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N无机氮具有明显亲和力,对其吸收量具有明显优势^[18]。根系对 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N吸收与同化是相互促进的,较高的 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N浓度可促进氮素同化与代谢,进一步促进根系对 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N吸收^[19]。氮高效品种根系对 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N最大吸收速率和亲和力均显著高于氮低效型品种^[20],氮高效品种根系氮代谢能力更强,氮低效品种较低的氮素同化能力使硝态氮和铵态氮在根系中积累过多,抑制根系对 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N持续吸收^[21],降低吸收速率。因此,氮高效品种根系不仅对硝态氮和铵态氮吸收能力强,同化能力也强于氮低效品种。

氮高效品种根系GS活性、硝酸还原酶活性、游离氨基酸含量、可溶性蛋白质含量均高于氮低效品种,硝态氮和铵态氮含量则相反。可溶性蛋白可以反映植株氮素代谢的强弱,游离氨基酸是植物体内氮化物的主要存在方式和运输形式。随氮肥水平的提高,叶片硝酸还原酶含量升高,也说明供氮诱导硝酸还原酶的合成,不仅补充氮源,而且促进氮素同化能力。在一定范围内,提高氮肥施用量可以提高组织中硝酸还原酶含量,加快根系对硝态氮吸收。同一氮水平下,不同品种间硝酸还原酶活性的差异,硝态氮在根部还原比例不同,不同品种玉米氮吸收能力也呈现一定差异。叶片中硝酸还原酶活性高,植株能有效地同化运输到地上部的硝态氮,较大程度上体现植株对氮素利用能力。因此,氮效率不同的玉米品种根系对硝态氮和铵态氮的吸收和利用具有一定差异。

硝态氮极易被淋溶至耕作层以下,有助于增强根系下扎能力,玉米生长后期,氮高效品种籽粒氮依赖于生育后期根系吸收和转移,氮低效品种则依赖于地上部营养体氮转移^[22]。氮高效玉米根系生育后期具有较强的吸收硝态氮和铵态氮能力,更有助于根系对氮素吸收和同化,表现较高的氮吸收和利用效率,成为氮效率高的基础。

1.4 氮高效玉米根系时空分布特征

玉米氮的吸收能力不仅与根系体积、表面积有关,与根系构型及空间分布也密切相关。根系分布包括根系在土壤中水平和垂直方向的伸展范围、不同土层中的根密度等,各生育时期根系分布不断变化,苗期根系主要分布于0~40 cm土层中,之后不断向纵深处伸展,至开花期入土深度可达160 cm,蜡熟期可达180 cm。可见,玉米主体根系主要分布于0~40 cm土层中,对水分和养分的吸收能力强弱与根量多少及其时空分布密切相关。不同氮效率基因型根系分布特征差异显著,玉米产量与20 cm以下土层内根系分布比例呈正相关,氮效率较高的玉米在花前形成强大的根系,为氮吸收奠定基础,其根系空间分布合理,活力峰值持续期长,具有明显的向肥性,施氮后能增加根长,扩大根系吸收的空间和范围,延长活跃吸收期,增强吸收能力。

根系时空分布对不同供氮水平的响应及与氮素吸收特性关系的研究,对于充分挖掘氮高效基因型,探讨氮高效栽培途径具有重要意义。过量施氮条件下,氮高效与氮低效品种在吐丝前根重无显著差异,吐丝后氮高效品种根重缓慢下降,根重高于氮低效品种。不施氮与适量施氮条件下,0~100 cm土层中氮高效品种根长均显著高于氮低效品种,吐丝期到乳熟期,不施氮时20 cm以内土层和40 cm以下土层中,氮高效品种根重下降速率较缓慢。适量施氮下两种类型品种0~40 cm土层中,根重降低速率无显著差异,但40 cm以下氮高效品种根重降低速率明显减缓。

各种氮效率基因型根系空间分布特征、氮吸收特性存在较大差异。在低氮和氮肥适量时,氮高效品种根系生物量、根长和根系衰老速率具有明显优势,其吐丝前氮吸收主要与单位根长氮吸收速率有关,吐丝后主要与根长有关;过量施氮条件下,吐丝前氮吸收主要受根长影响,吐丝后则主要与单位根长氮吸收速率有关。氮高效品种无论是否施氮,吐丝后40 cm土层以下根系衰老速率都较氮低效品种缓慢,利于防止生育后期根系出现早衰而影响氮吸收^[23]。

2 展 望

对氮素吸收利用的研究,尽管前人已做许多贡献,也取得了卓越研究成果,但仍有较多问题不明确,仍需对氮效率的生理基础作进一步深入研究。如:液泡中积累的硝态氮再利用能力与氮

效率高低的关系、植株体内地上部与根间氮循环特征与氮效率高低的关系等,关于如何进一步促进植株体内各类碳水化合物的合成、运输和分配,如何提高分配效率及与提升氮效率的关系等仍需进一步深入研究,如何准确地判断光合效率、呼吸效率与氮效率的关系,提高氮高效玉米根系构型与氮效率匹配程度的生理机制及有效措施等,这些均是未来氮效率研究的重要方向和研究内容,是氮高效玉米发展的关键。

已有研究表明,深松耕作能提高0~80 cm土层根长、表面积、干重,提高根系对养分吸收能力^[24]。深耕配合秸秆还田并增施氮肥能够提高氮素农学效率和氮素表观利用率、氮效率,氮收获指数却较低^[25],深松或深翻等不同耕作方式,改善了根系构型,扩展了根系分布空间,在此基础上,氮效率是否显著提高有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 屈佳伟,高聚林,于晓芳,等.不同氮效率玉米品种对土壤硝态氮时空分布及农田氮素平衡的影响[J].作物学报,2018,44(5):737-749.
- [2] 王艳,米国华,陈范骏,等.玉米氮素吸收的基因型差异及其与根系形态的相关性[J].生态学报,2003,23(2):297-302.
- [3] Wang Y, Mi G H, Chen F J, et al. Response of root morphology to nitrate supply and its contribution to nitrogen uptake in maize [J]. Journal of Plant Nutrition, 2004, 27: 2189-2202.
- [4] 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[J].植物营养与肥料学报,2005,11(5):615-619.
- [5] 李燕婷,米国华,陈范骏,等.玉米幼苗地上部/根间氮的循环及其基因型差异[J].植物生理学报,2001,27(3):226-230.
- [6] Lawlor D W. Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: Mechanisms are the key to understanding production system[J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53: 773-787.
- [7] 马存金,刘鹏,赵秉强,等.施氮量对不同氮效率玉米品种根系时空分布及氮素吸收的调控[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):845-859.
- [8] 程乙,王洪章,刘鹏,等.品种和氮素供应对玉米根系特征及氮素吸收利用的影响[J].中国农业科学,2017,50(12):2259-2269.
- [9] 熊淑萍,吴克远,王小纯,等.不同氮效率基因型小麦根系吸收特性与氮素利用差异的分析[J].中国农业科学,2016,49(12):2267-2279.
- [10] 黄亚楠,杨顺瑛,赵广欣,等.根系高效铵吸收系统是玉米获取氮素的重要补充机制[J].植物营养与肥料学报,2017,23(3):615-621.
- [11] 屈佳伟,高聚林,王志刚,等.玉米根系特征的基因型差异及与氮吸收效率的关系[J].玉米科学,2016,24(2):72-78.
- [12] WANG Q, WANG P, YANG X, et al. Effects of nitrogen application time on root distribution and its activity in maize (*Zea mays* L.) [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36:1469-1475.
- [13] 王敬锋,刘鹏,赵秉强,等.不同基因型玉米根系特性与氮素吸收利用的差异[J].中国农业科学,2011,44(4):699-707.
- [14] 齐文增,刘慧慧,李耕,等.超高产夏玉米根系时空分布特点[J].植物营养与肥料学报,2012,18(1):69-76.
- [15] 路海东,薛吉全,马国胜,等.陕西榆林春玉米高产田土壤理化性状及根系分布[J].应用生态学报,2010,21(4):895-900.
- [16] 王空军,郑洪建,刘开昌,等.我国玉米品种更替过程中根系时空分布特性的演变[J].植物生态学报,2001,25(4):472-475.
- [17] 王艳.光照和氮对不同氮效率玉米品种生长及氮素吸收的影响[J].农业现代化研究,2011,32(4):479-482.
- [18] 孙敏,郭文善,朱新开,等.不同氮效率小麦品种苗期根系的 NO_3^- 、 NH_4^+ 吸收动力学特征[J].麦类作物学报,2006,26(5):84-87.
- [19] 熊淑萍,吴克远,王小纯,等.不同氮效率小麦品种苗期根系氮代谢及其吸收能力差异分析[J].麦类作物学报,2016,36(3):325-331.
- [20] 李新鹏,童依平.植物吸收转运无机氮的生理及分子机制[J].植物学通报,2007,24(6):714-725.
- [21] 门中华,李生秀.水培硝态氮浓度对冬小麦幼苗氮代谢的影响[J].广西植物,2010,30(4):544-550.
- [22] Krapp A, Aniel Vedele F. Arabidopsis roots and shoots show distinct temporal adaptation patterns toward nitrogen starvation [J]. Plant Physiology, 2011, 157(3):1255-1282.
- [23] 屈佳伟,高聚林,王志刚,等.不同氮效率玉米根系时空分布与氮素吸收对氮肥的响应[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1212-1221.
- [24] 张凤杰,孙继颖,高聚林,等.春玉米根系形态及土壤理化性质对深松深度的响应研究[J].玉米科学,2016,24(6):88-96.
- [25] 赵亚丽,于淑婷,穆心愿,等.深耕加秸秆还田下施氮量对土壤碳氮比、玉米产量及氮效率的影响[J].河南农业科学,2016,45(10):50-54.

(责任编辑:王昱)