

玉米根系生长特性及氮肥运筹对根系生长的影响

张玉^{1,2} 秦华东^{1,3} 伍龙梅¹ 张婧¹ 李忠¹ 黄敏¹ 江立庚^{1*}

(1. 广西大学 作物栽培学与耕作学实验室, 南宁 530005;

2. 广西农业科学院 玉米研究所, 南宁 530007;

3. 广西大学 图书馆, 南宁 530005)

摘要 为明确玉米根系在土壤中的生长特性,通过根箱试验,利用 WinRhizo 根系分析软件,分析不同氮肥运筹、不同株型品种对玉米根系生长及分布的影响。研究表明,玉米根系由直径为 ≤ 1 mm、直径在 1~2 mm 以及直径 > 2 mm 的根群组成。在盆栽条件下,玉米根系直径 ≤ 1 mm 的根群的长度、面积及体积分别占总根系 80%、50%及 20%以上,是根系吸收水肥的主要区域。不同氮肥运筹对玉米根系具有不同的影响。重基肥处理增加根系生物总量,并且增加根系分枝的数量,以及直径 ≤ 1 mm 的不定根系的各项几何参数,有利于提高水肥摄取效率。反之,适当少量施入基肥,则显著增加直径为 2 mm 以上的不定根的数量、长度、面积及体积等相关生物量,有利于促进根系下扎,提高根系健壮程度。不同株型玉米品种根系的生长趋势具有显著差异。披散型品种在生育前期根系生长量均显著高于紧凑型品种,在生育后期紧凑型品种根系的生长量均高于披散型品种,且在生育后期根系生长较披散型品种旺盛。紧凑型品种根系的构型变化较披散型玉米品种更有利于玉米后期生长及产量的建成。

关键词 玉米;根构型;氮肥处理;株型

中图分类号 S 513; S 31

文章编号 1007-4333(2014)06-0062-09

文献标志码 A

Growth characteristics and the effect of nitrogen application on the maize root

ZHANG Yu^{1,2}, QIN Hua-dong^{1,3}, WU Long-mei¹, ZHANG Jing¹,
LI Zhong¹, HUANG Min¹, JIANG Li-geng^{1*}

(1. Key Laboratory of Crop Cultivation and Farming System, Guangxi University, Nanning 530005, China;

2. Maize Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530227, China;

3. Library, Guangxi University, Nanning 530005, China)

Abstract The objective of this study was to clarify the growth characteristics of the maize root. Root box experiments were conducted to collect root distribution data. Moreover, influences of difference N-fertilizer treatment and different plant type on root growth were analyzed with WinRhizo software. The results showed that the maize roots composed of the roots of diameter ≤ 1.00 mm, between 1 and 2 mm and > 2 mm. At the condition of pot culture, the length percent was over 80%, and area percent over 50%, and volume percent was over 20% in total root of the adventitious root and the first branch of roots (diameter ≤ 1.00 mm) which was the main area of root absorption of water and fertilizer. Different N fertilization strategies had different effects on maize roots. Base fertilizer increase had impact on maize root number and root total length and increased the roots (0-20 cm level) number and total biomass, and increased all the geometric parameters of the roots (diameter ≤ 1.00 mm). It was beneficial to improve the water and fertilizer uptake efficiency. Conversely, base fertilizer increase had impact on all the geometric parameters and total biomass of the roots (diameter > 2.00 mm). It was beneficial to promote the root downward growth and increase the root robust degree.

收稿日期: 2014-05-05

基金项目: 广西科技攻关项目(桂科攻 10100004-6)

第一作者: 张玉, 助理研究员, 博士, 主要从事作物生理生态研究, E-mail: zhyu2@foxmail.com

通讯作者: 江立庚, 教授, 博士生导师, 主要从事作物生理生态研究, E-mail: jiang@gxu.edu.cn

Growth trend had significant difference on maize roots with different canopy-type. The root growth quantity of flat canopy-type was significant more than the compact canopy-type's at early growth stage. The root growth quantity of compact canopy-type was significant more than the flat canopy-type's at late growth stage and the roots growth was more vigorous than the flat canopy-type's. The changes of compact canopy-type root configuration were more beneficial for the maize growth than the flat canopy-type at late stage and raised the output of production.

Key words maize; root architecture; N-fertilizer treatment; plant type

玉米是世界上最重要的谷类粮食作物之一,种植面积仅次于水稻,总产量居粮食作物首位。根系是植株吸收营养、水分的重要器官,培育发达、健壮的根系是实现作物增产潜力的重要措施及手段^[1-2]。因此,作物根系越来越受到现代农业科学研究的重视^[3-4]。国内外对玉米根系形态及生理特性等做了大量的工作^[3,5-6],但对根系生长特性和构成、根系分布与冠层空间分布的关系、不同调控措施对根系生长的影响研究还不足。

氮素供应对玉米根系的生长和形态、根系在介质中的分布、根系生理及分泌等有明显影响。玉米根系形态及其在土壤中的时空分布差异是造成氮素吸收效率差异的重要因素^[7]。王敬锋等^[8]发现,氮高效玉米品种具有较高的根系干重,土壤深层根系分布多,根系空间分布合理。根系拓扑结构反映根系的分枝状况、连接数量以及根系在土层中的空间分布。根系的拓扑结构特征作为根系构型的重要组成部分,决定根系在土壤中的空间分布属性,影响根系营养吸收能力和固定作用^[9]。

本研究采用 WinRhizo 软件获取根系的各项指标数据,研究株叶型明显不同的 2 个玉米品种的根系生长与组成特征,及氮肥管理对玉米根系生长和组成分布的影响,旨在为阐明玉米根系生长及调控提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 时间、地点、材料及方法

2011 年晚季和 2012 年早季在广西大学农学院农场试验大棚进行根箱试验,试验地点经纬度 22°51'N、108°17'W,海拔 84 m,属亚热带季风气候区,年平均日照时数 1 827 h,年降雨 1 304.2 mm,无霜期 345~360 d,年均气温 21.7 °C。试验大棚为南北朝向,棚宽 8 m,长 30 m,肩高 2.5 m,顶高 3.5 m。人字型顶棚铺设 5 mm 浮法玻璃面,四周为 5 mm 孔径筛网为侧墙,便于通风透气,拱杆采用热浸镀锌钢架结构,材质为 φ25 mm×2 mm 热镀锌管,无加温设备。

试验土壤取自玉米旱地 0~80 cm 土层土壤,0~20 cm 土层土壤,基本理化性状见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Soil characters of experimental soils

| 年份 Year | pH | 有机质含量/ (g/kg) Organic | 全氮含量/ (g/kg) Total N | 全磷含量/ (g/kg) Total P | 全钾含量/ (g/kg) Total K | 碱解氮含量/ (mg/kg) Available N | 速效磷含量/ (mg/kg) Available P | 速效钾含量/ (mg/kg) Available K |
|------------|------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 2011 | 7.35 | 17.27 | 1.52 | 0.62 | 18.05 | 86.85 | 21.63 | 257.00 |
| 2012 | 7.08 | 20.18 | 1.45 | 0.57 | 37.38 | 54.27 | 19.80 | 261.50 |

共进行了 2 个试验。试验 1 供试玉米品种为正 大 619 和血丝玉米。其中,正大 619 为广西主栽玉米品种,株型紧凑,血丝玉米为地方玉米品种,株型松散。血丝玉米和正大 619 是株型和产量潜力相差较大的 2 个玉米品种。血丝玉米是贵州省黄平县纸房乡的农家品种,因籽粒上带有红色条纹,故名。属 *Zea mays* L. *indruata* Sturt. 亚种。其株型松散,抗倒力较弱,产量潜力较低。正大 619 是四川正大公

司采用来自热带和温带种缘的自交系 F06 母本、F19 父本杂交而成的玉米单交品种,其株型紧凑,产量潜力较高。

试验采用木制根箱,其长、宽、高分别为 50 cm、50 cm 和 80 cm。根箱底部设置一透水孔,孔径 5 cm。根箱中土壤从玉米地挖取,每 20 cm 为一层,土壤晒干、锤碎、清捡砖石等杂物并过筛后按原始土壤层次填入根箱中,并压实。在填土过程中,分

别于20、40和60 cm土层插入带孔(3 mm×3 mm圆孔)不锈钢网。不锈钢网能将玉米根系分层,并在冲洗时固定根系,以确保根系的完整。

试验1供试玉米品种为广西主栽玉米品种正大619,在2011年9月进行。每根箱施用尿素24.46 g,设置3种施肥运筹方式。重穗肥处理:基肥施入40%,拔节期10~15 d后施入20%,玉米大喇叭口期(抽雄前10~15 d)施入40%。平衡施肥处理:基肥施入50%,拔节期10~15 d后施入20%,玉米大喇叭口期(抽雄前10~15 d)施入30%。重基肥处理:基肥施入60%,拔节期10~15 d后施入20%,玉米大喇叭口期(抽雄前10~15 d)施入20%。3次重复,共9根箱。全部P肥和50%的K肥作基肥一次性施入,另50%K肥在拔节期10~15 d后施入。

试验2在2012年3月进行,共种植12根箱。每根箱总施肥量为:尿素24.46 g、过磷酸钙31.25 g、氯化钾12.50 g,相当于田间施总N 450 kg/hm²、P₂O₅ 150 kg/hm²、K₂O 300 kg/hm²。作为基肥一次性施入,苗期施入总N肥的5%,拔节期10~15 d后施入总N肥的15%,玉米大喇叭口期(抽雄前10~15 d)施入总N肥的30%。P、K肥施用量及施用方法同试验1。

1.2 试验材料的种植及管理

根箱制作完成并装土后,立即充分灌水,使底土紧实(灌水方法:播种之前,测定土壤密度及当前土壤持水量,经计算后充分灌水使其达到土壤最大持

水量的80%,灌水后的第3天进行播种)。播种时在每根箱中央区域播种2~4粒饱满种子,在五叶期前,选择1株留苗。

考虑到大棚内与棚外温差,根据玉米生育期水份需求的规律,设计的灌水数量及方法如下:全生育期2.5 m³/箱,使土壤含水量达80%左右;在开花期之前,每5~7 d浇1次水,每次水量为0.125 m³/箱,开花期以后,每3~5 d浇1次水,每次水量为0.125 m³/箱,使土壤含水量达60%以上。

1.3 测定内容及计算方法

在拔节期与灌浆盛期进行根系性状的测定。测定前用自来水小心冲洗,获得完整根系。逐条用WinRhizo Pro 2009c根系分析软件对其进行扫描,并用该软件分析测定根总长、根总面积等参数。然后105℃杀青,30 min后在80℃烘干至恒重,称重。

2 结果与分析

2.1 不同玉米品种根系长度及其组成和分布

由表2可知,在盆栽条件下,拔节期玉米单株根系长度超过5 000 cm,灌浆盛期玉米单株根系长度超过19 000 cm。从组成来看,根系长度主要由直径≤1 mm的根系组成,拔节期与灌浆盛期≤1 mm的根系长度占根系总长度的比例均超过了80%,直径1~2 mm根系长度占10%左右,而直径>2 mm的根系长度在3%以下。这表明,根系直径越小,其长度占根系总长度中的比例越大。

表2 血丝玉米及正大619不同生育期的根系长度及组成

Table 2 Root length and composition of XieSi corn and ZhengDa 619 in different growth stage

| 生育时期 Growth stage | 品种 Varieties | 总根长/ 10 ³ cm Total root length | 平均直径/ mm Average diameter | 根茎/mm Root diameter | | | | | |
|--------------------------------|----------------------|--|------------------------------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| | | | | ≤1 | | 1~2 | | >2 | |
| | | | | 根系长度/ 10 ³ cm | 根长 比例/% | 根系长度/ 10 ³ cm | 根长 比例/% | 根系长度/ 10 ³ cm | 根长 比例/% |
| 拔节期 Elongation stage | 血丝玉米 XieSi corn | 5.55 a | 0.71 A | 4.7 a | 84.30 b | 0.71 a | 12.9 a | 154.3 a | 2.78 a |
| | 正大619 ZhengDa 619 | 5.48 a | 0.56 B | 4.8 a | 88.10 a | 0.56 a | 10.3 b | 88.5 a | 1.62 b |
| 灌浆盛期 Grain filling stage | 血丝玉米 XieSi corn | 19.60 b | 0.59 a | 17.3 b | 88.10 a | 1.84 B | 9.4 a | 499.8 b | 2.55 a |
| | 正大619 ZhengDa 619 | 27.90 a | 0.62 a | 24.1 a | 86.50 a | 3.04 A | 10.9 a | 734.5 a | 2.64 a |

注:表中数据为3个重复的平均数,同列数字同一时期后面大、小字母不同者,经邓肯氏检验达到 $P=0.05$ 或 $P=0.01$ 水平差异。下表同。

Note: Data are the mean value of three repetitions in the same treatment, data with different letter in the same column are significant difference at 5% or 1% levels(Duncan method). The same as below.

表2还表明,2个玉米品种的根系生长及其组成存在很大的差异。正大619拔节期根系长度比血丝玉米略小,但灌浆盛期根系长度显著高于血丝玉米。正大619拔节期根系平均直径显著小于血丝玉米,灌浆盛期根系平均直径略大于血丝玉米。正大619拔节期直径 ≤ 1 mm根系长度占根系总长度的比例显著高于血丝玉米,灌浆盛期则略小于血丝玉米。相反,正大619拔节期直径 > 2 mm根系长度占根系总长度的比例显著低于血丝玉米,灌浆盛期则略高于血丝玉米。分析表明,正大619前期小根系(直径 ≤ 1 mm)生长较血丝玉米旺盛,后期大根系(直径 > 2 mm)生长较血丝玉米旺盛,其根系总长度显著高于血丝玉米的原因是其小根系生长旺盛。

2.2 不同玉米品种根系表面积及其组成和分布

由表3可知,在盆栽条件下,拔节期玉米单株根

系面积达到 800 cm^2 以上,灌浆盛期玉米单株根系面积达到 $3\ 000\text{ cm}^2$ 以上。正大619拔节期根系面积比血丝玉米略小,但其在灌浆期的根系面积显著高于血丝玉米。各品种直径 ≤ 1 mm的根系的面积占根系总面积的50%以上,直径在 $1\sim 2$ mm之间的根系比例在26%~32%,直径 > 2 mm的根系比例在16%以下。分析表明,根系直径越小,其面积占根系总面积中的比例越大。

2个品种比较,在拔节期,血丝玉米各直径根系面积及根系总面积均比正大619大,但品种间的差异并不显著,各直径根系面积占该品种根系总面积比例的品种间差异也不显著。然而,正大619灌浆期根系总面积及各直径根系面积均大于血丝玉米,其差异达到显著或极显著水平,各直径根系面积占该品种根系总面积比例的品种间差异依然不显著。分析表明,正大619根系优势主要表现在生育后期。

表3 血丝玉米及正大619不同生育时期的根系面积及组成

Table 3 Root area and composition of XieSi corn and ZhengDa 619 in different growth stage

| 生育时期 Growth stage | 品种 Varieties | 总根面积/ cm^2 Root Area | 根茎/mm Root diameter | | | | | |
|--------------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| | | | ≤ 1 | | 1~2 | | > 2 | |
| | | | 根系面积/ 10^3 cm^2 | 面积 比例/% | 根系面积/ 10^3 cm^2 | 面积 比例/% | 根系面积/ 10^3 cm^2 | 面积 比例/% |
| 拔节期 Elongation stage | 血丝玉米 XieSi corn | 1 104.4 a | 517.8 a | 53.4 a | 311.7 a | 32.1 a | 140.2 a | 14.5 a |
| | 正大619 ZhengDa 619 | 874.6 a | 458.0 a | 59.1 a | 241.6 a | 31.2 a | 75.8 a | 9.8 a |
| 灌浆盛期 Grain filling stage | 血丝玉米 XieSi corn | 3 352.0 B | 1 735.3 b | 58.7 a | 764.2 B | 25.8 a | 458.8 b | 15.5 a |
| | 正大619 ZhengDa 619 | 5 151.9 A | 2 605.8 a | 57.0 a | 1 270.8 A | 27.8 a | 692.4 a | 15.2 a |

2.3 不同玉米品种根系体积及其组成和分布

由表4可知,拔节期玉米单株根系体积达到 13 cm^3 以上,灌浆盛期玉米单株根系体积达到 50 cm^3 以上。正大619拔节期根系体积比血丝玉米略小,但其在灌浆期则显著高于血丝玉米。各品种灌浆期的根系体积均成倍高于拔节期。在盆栽条件下,各品种直径 ≤ 1 mm的根系体积占根系总体积的20%以上,直径在 $1\sim 2$ mm之间的根系比例

在33%~46%,直径 > 2 mm的根系比例在40%以上。2个品种比较,血丝玉米拔节期的各个根区均比正大619高,但没有达到显著水平。血丝玉米灌浆期直径 ≤ 1 mm的根系体积比正大619低57.1%,直径 > 2 mm的根系体积比正大619低59.1%,两者的差异均达到1%极显著水平;血丝玉米灌浆期直径在 $1\sim 2$ mm之间的根系体积比正大619低67.4%,差异达到5%显著水平。

表4 血丝玉米及正大619不同生育时期的根系体积及组成

Table 4 Root volume and composition of XieSi corn and ZhengDa 619 in different growth stage

| 生育时期 Growth stage | 品种 Varieties | 总根体积/ 10 ³ cm ³ Root volume | 根茎/mm Root diameter | | | | | |
|--------------------------------|----------------------|---|--|------------|--|------------|--|------------|
| | | | ≤1 | | 1~2 | | >2 | |
| | | | 根系体积/ 10 ³ cm ³ | 体积 比例/% | 根系体积/ 10 ³ cm ³ | 体积 比例/% | 根系体积/ 10 ³ cm ³ | 体积 比例/% |
| 拔节期 Elongation stage | 血丝玉米 XieSi corn | 21.9 a | 6.20 a | 21.3 a | 11.20 a | 38.6 B | 11.70 a | 40.1 a |
| | 正大619 ZhengDa 619 | 13.2 a | 4.81 a | 25.4 a | 8.58 a | 45.3 A | 5.54 b | 29.2 b |
| 灌浆盛期 Grain filling stage | 血丝玉米 XieSi corn | 53.2 B | 20.00 b | 24.2 a | 26.40 B | 32.0 a | 36.10 b | 43.8 a |
| | 正大619 ZhengDa 619 | 83.5 A | 31.40 a | 23.6 a | 44.10 A | 33.2 a | 57.50 a | 43.2 a |

2.4 不同玉米品种的根系拓扑结构分析

在表5中可以发现,拔节期玉米单株根系数量达到18条以上,灌浆盛期玉米单株根系数量达到48条以上。拔节期血丝玉米的不定根根系的数量比正大619多9条,且达到显著水平,该期主根干重也比正大619多0.83 g,不定根长度也高于正大619品种57.2 cm,但没有达到显著水平。在灌浆盛期,正大619的主根数量比血丝玉米多8.34条,根系总干重也比血丝玉米高3.26 g,正大619拔节期根系数量与血丝玉米差异达到5%的

显著水平,但其在灌浆期两品种根系数量基本接近。

在盆栽条件下,各品种分形维数在1.39~1.46,其中在拔节期正大619的分形维数比血丝玉米小5%,且达到5%的显著水平。2个品种的分形维数在拔节期在7 500~9 600,灌浆盛期则达到拔节期的3~5倍。根系的分枝数在拔节期在13 700~15 800,灌浆盛期也达到拔节期的4倍以上。在灌浆盛期正大619的分枝数比血丝玉米大41.8%,且达到5%的显著水平。

表5 血丝玉米及正大619不同生育时期的根系拓扑结构

Table 5 Root topological structure of XieSi corn and ZhengDa 619 in different growth stage

| 生育时期 Growth stage | 品种 Varieties | 根系数量/条 Adventitious roots quantity | 根系干重/g Root dry weight | 不定根长度/cm Adventitious roots length | 分形维数 Fractal Dimension | 根尖数/ 10 ³ 个 Tips | 分枝数/ 10 ³ 个 Forks |
|--------------------------------|----------------------|--|------------------------------|--|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 拔节期 Elongation stage | 血丝玉米 XieSi corn | 26.0 a | 3.18 a | 737.2 a | 1.46 A | 7.56 a | 15.8 a |
| | 正大619 ZhengDa 619 | 17.0 b | 2.35 a | 680.0 a | 1.39 B | 9.61 a | 13.7 a |
| 灌浆盛期 Grain filling stage | 血丝玉米 XieSi corn | 41.3 a | 12.80 a | 2 221.5 a | 1.44 a | 33.80 a | 55.8 b |
| | 正大619 ZhengDa 619 | 49.7 a | 16.00 a | 2 167.5 a | 1.45 a | 42.30 a | 79.1 a |

2.5 氮肥运筹方式对不同玉米品种根系生长的影响

2.5.1 氮肥运筹方式对根系长度及分布的影响

由表6可知,拔节期重基肥的根系长度比其他2个处理分别高出150.5%、57.8%,且达到1%的极显著水平。3个处理比较,重基肥直径 ≤ 1 mm的根系的长度比其他2个处理高162.4%、59.2%,且与重穗肥处理达到5%的显著水平。直径在1~2 mm之间的根系的长度比其他2个处理高76.7%、81.0%。在灌浆盛期,重穗肥的根系长度比其他2个处理分别高出67.5%、60.7%,且达到1%的极显著水平, ≤ 1 mm直径的根系的长度比其他2

个处理高86.1%、76.0%,且达到极显著水平。直径 > 2 mm的根系的总长重穗肥比重基肥小59.8%,且达到显著水平。分析表明,在总施氮量一定时,氮肥运筹极显著影响根系长度,重施穗肥处理玉米拔节期根系总长度和直径 ≤ 1 mm根系长度明显小于平衡施肥和重基肥处理,而其灌浆盛期根系总长度和直径 ≤ 1 mm根系长度明显大于平衡施肥和重基肥处理。虽然直径不同的根系长度存在一定的差异,但是其长度占根系总长度的比例在3个处理间的差异在2个生育期均不显著。上述分析表明,氮肥运筹显著影响根系长度,但不影响直径不同根系长度在总根系长度中的比例。

表6 氮肥处理对不同生育时期的玉米根系根长及组成的影响

Table 6 Effect of different N-fertilizer treatments on maize root length and composition in different growth stage

| 生育时期 Growth stage | 氮肥处理 N-fertilizer treatment | 总根长/ 10 ³ cm Total root length | 平均直径/ mm Average diameter | 根茎/mm Root diameter | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| | | | | ≤ 1 | | 1~2 | | > 2 | |
| | | | | 根系长度/ 10 ³ cm | 根长 比例/% | 根系长度/ 10 ³ cm | 根长 比例/% | 根系长度/ 10 ³ cm | 根长 比例/% |
| 拔节期 Elongation stage | 重穗肥 | 2.91 B | 0.55 a | 2.45 b | 82.7 a | 0.43 a | 16.5 a | 27.9 a | 0.83 a |
| | 平衡施肥 | 4.62 B | 0.51 a | 4.04 a | 87.7 a | 0.42 a | 9.1 a | 149.6 a | 3.25 a |
| | 重基肥 | 7.29 A | 0.48 a | 6.43 a | 88.3 a | 0.76 a | 10.4 a | 98.4 a | 1.32 a |
| 灌浆盛期 Grain filling stage | 重穗肥 | 19.60 A | 0.63 a | 16.90 A | 86.0 a | 1.97 a | 10.2 a | 749.8 b | 3.78 a |
| | 平衡施肥 | 11.70 AB | 0.69 a | 9.08 B | 77.7 a | 1.65 a | 13.9 a | 1 001.4 ab | 8.32 a |
| | 重基肥 | 12.20 B | 0.72 a | 9.60 B | 77.3 a | 1.67 a | 13.3 a | 1 198.5 a | 9.42 a |

2.5.2 氮肥运筹方式对不同玉米品种根系面积及分布的影响

在表7中可以发现,拔节期重基肥处理的总根面积比其他2个处理高130.4%和49.3%,与重穗肥处理差异达到5%的显著水平,其直径 ≤ 1 mm的根面积也比其他2个处理高156.5%、73.5%,与重穗肥处理差异达到显著水平。在灌浆盛期,重穗肥处理的总根面积、直径 ≤ 1 mm的根面积极显著或显著高于其他2个处理。分析表明,在总施氮量一定时,氮肥的运筹显著影响根系面积,重施穗肥处理玉米拔节期根系总面积明显小于平衡施肥和重基肥处理,而其灌浆盛期根系总面积明显大于平衡施肥和重基肥处理。而且,直径不同根系面积占总面积的比例有时也存在显

著差异。

2.5.3 氮肥运筹方式对根系体积及分布的影响

表8表明,拔节期重基肥处理的总根体积以及直径 ≤ 1 mm的根体积均比其他处理大,且与重穗肥处理达到显著水平。灌浆盛期,重施穗肥处理玉米根系总面积、直径 ≤ 1 mm和直径在1~2 mm根系面积在3个处理中均是最高的,差异达显著水平。直径不同根系面积占根系总面积的比例也存在一定的差异,重施穗肥处理玉米直径 ≤ 1 mm和直径1~2 mm根系面积占根系总面积的比例最大,直径 > 2 mm根系面积占根系总面积的比例最小。试验再次证明,氮肥运筹对根系生长产生了较大的影响,对直径不同的根系的影响存在一定差异。

表7 氮肥处理对不同生育时期的玉米根系面积及组成的影响

Table 7 Effect of the maize root area and composition under the different N-fertilizer treatments in different growth stage

| 生育时期 Growth stage | 氮肥处理 N-fertilizer treatment | 总根面积/ 10 ³ cm ² Root Area | 根茎/mm Root diameter | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|---|--|------------|--|------------|--|------------|
| | | | ≤1 | | 1~2 | | >2 | |
| | | | 根系面积/ 10 ³ cm ² | 面积 比例/% | 根系面积/ 10 ³ cm ² | 面积 比例/% | 根系面积/ 10 ³ cm ² | 面积 比例/% |
| 拔节期 Elongation stage | 重穗肥 | 0.46 b | 0.23 b | 53.7 a | 0.18 a | 41.9 a | 0.02 b | 4.47 b |
| 灌浆盛期 Grain filling stage | 平衡施肥 | 0.71 a | 0.34 ab | 52.7 a | 0.20 a | 29.8 a | 0.11 a | 17.50 a |
| | 重基肥 | 1.06 a | 0.59 a | 58.1 a | 0.32 a | 34.7 a | 0.07 a | 7.26 ab |
| 灌浆盛期 Grain filling stage | 重穗肥 | 3.79 A | 1.79 a | 53.5 a | 0.81 a | 24.4 a | 0.75 b | 22.10 b |
| | 平衡施肥 | 2.60 B | 1.14 b | 39.9 b | 0.70 a | 24.5 a | 1.08 ab | 35.70 a |
| | 重基肥 | 2.61 B | 1.13 b | 37.4 b | 0.72 a | 22.7 a | 1.43 a | 39.90 a |

表8 氮肥处理对不同生育时期的玉米根系体积及组成的影响

Table 8 Effect of maize root volume and composition under different N-fertilizer treatments in different growth stage

| 生育时期 Growth stage | 氮肥处理 N-fertilizer treatment | 总根体积/ 10 ³ cm ³ Root Area | 根茎/mm Root diameter | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|---|--|------------|--|------------|--|------------|
| | | | ≤1 | | 1~2 | | >2 | |
| | | | 根系体积/ 10 ³ cm ³ | 体积 比例/% | 根系体积/ 10 ³ cm ³ | 体积 比例/% | 根系体积/ 10 ³ cm ³ | 体积 比例/% |
| 拔节期 Elongation stage | 重穗肥 | 6.48 b | 3.12 b | 30.2 a | 6.28 a | 59.3 a | 1.17 b | 10.5 b |
| 灌浆盛期 Grain filling stage | 平衡施肥 | 9.79 ab | 3.74 b | 20.7 a | 7.57 a | 41.0 a | 6.89 a | 38.3 a |
| | 重基肥 | 13.60 a | 7.20 a | 29.0 a | 11.30 a | 52.7 a | 4.28 ab | 18.3 ab |
| 灌浆盛期 Grain filling stage | 重穗肥 | 61.61 a | 21.80 a | 19.3 a | 27.50 a | 24.8 a | 66.20 a | 55.8 a |
| | 平衡施肥 | 47.87 b | 8.00 b | 11.0 a | 13.30 b | 18.3 a | 46.00 a | 70.8 a |
| | 重基肥 | 46.52 b | 7.74 b | 9.4 a | 11.90 b | 15.0 a | 49.20 a | 75.6 a |

2.5.4 氮肥运筹方式对玉米根系拓扑结构的影响

从表9中可以看出,灌浆盛期中根系干重参数上,平衡施肥极显著低于其他处理。重穗肥在根尖

数、分枝数均比其他处理高,且达到显著与极显著水平。说明,不同氮肥运筹明显促进不同生育时期根的生长与新根的形成,促进根系功能期延长。

表9 氮肥处理对不同生育时期的玉米根系拓扑结构的影响

Table 9 Effect of maize root topological structure under different N-fertilizer treatments in different growth stage

| 生育时期 Growth stage | 氮肥处理 N-fertilizer treatment | 根系数量/条 Adventitious roots quantity | 根系干重/g Root dry weight | 不定根长度/cm Adventitious roots length | 分形维数 Fractal Di-mension | 根尖数/ 10 ³ 个 Tips | 分枝数/ 10 ³ 个 Forks |
|--------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------------|--|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 拔节期 Elongation stage | 重穗肥 | 17.0 a | 1.73 a | 0.59 a | 1.44 a | 7.9 a | 12.8 b |
| 灌浆盛期 Grain filling stage | 平衡施肥 | 18.7 a | 3.27 a | 0.64 a | 1.47 a | 10.4 a | 26.8 a |
| | 重基肥 | 22.0 a | 2.52 a | 0.58 a | 1.43 a | 18.2 a | 29.6 a |
| 灌浆盛期 Grain filling stage | 重穗肥 | 45.5 a | 15.50 A | 1.44 a | 1.51 a | 36.5 a | 90.1 A |
| | 平衡施肥 | 39.0 a | 9.62 B | 1.35 a | 1.54 a | 21.2 b | 42.9 B |
| | 重基肥 | 47.0 a | 15.10 A | 1.65 a | 1.56 a | 28.6 b | 53.8 B |

3 讨论

3.1 玉米根系生长与株型及产量潜力的关系

本研究表明,这2个玉米品种的根系生长存在明显的差异。正大619拔节期的根系长度、根系平均直径、根系表面积、体积均比血丝玉米低,而灌浆盛期根系各参数则显著高于血丝玉米。同时,正大619直径 ≤ 1 mm,1~2 mm之间的根系各生物量均显著高于血丝玉米。表明正大619后期根系生长较血丝玉米旺盛。根系生长是一个地上部与地下部相互影响,相互促进的统一过程^[10]。根系的生长状况与产量显著相关^[11-12],发育良好的根系显著提高单产水平。不同层次的根对产量的贡献不同,尤其是生育中后期所形成的根系对产量性状的形成具有积极的意义^[13]。本研究发现,根系水肥吸收的主要区域为直径1~2 mm根系的根区,该根区占80%的根长、50%的根面积以及20%以上的根系体积。因此,根系长度状况对根系功能影响最大,其次为根系面积,最后为根体积。根系体积状况可能对增强植株固定能力、抗倒伏性状等具有一定的意义。

3.2 氮肥运筹显著影响玉米根系的生长

研究表明,氮肥运筹对玉米根系的数量、长度、面积和体积均有显著影响。在本试验设计的3种氮肥运筹方式中,拔节期重施穗肥处理玉米的根系长度、面积、体积均显著下降,灌浆盛期则显著上升。重施基肥和平衡施肥根系长度、面积、体积的差异比较小。分析其原因,可能与施肥时间及根系发生时间的相关性有关。因为,玉米根系的发生主要在生育前期,而穗肥的施用却在生育后期。在施氮量一定时,重施穗肥处理减少了前期肥料的施用,必然对前期根系的发生和生长产生影响,导致其根系的长度、面积和体积下降。相反,重施穗肥增加了后期的氮肥的施用,促进了后期根系的生长,导致灌浆盛期根系的长度、面积和体积明显增加。研究发现,3个氮肥处理根系平均直径的差异在2个生育期均不显著,但是氮肥运筹对直径不同根系的影响是不同的,重施穗肥处理玉米品种正大619直径为1~2 mm根系的面积、体积等占根系总面积和总体积的比例是最高的。这可能与不同时期发生根系的直径不同有关^[14],其他作物也有类似的报道^[15-16]。在本试验中,正大619拔节期根系平均直径比灌浆盛期的小,血丝玉米拔节期根系平均直径比灌浆盛期的大(表2)。试验进一步证实了玉米不同生育时期发生根系

的直径是不同的,而且与品种类型有关。由此推测,重施穗肥促进了正大619中后期直径1~2 mm根系的发生和生长,导致其面积、体积等占根系总面积和总体积的比例增加。这表明,不同氮肥处理对作物根系生长具有一定的引导作用^[17],重施穗肥不仅对促进玉米增产和提高氮肥利用率有重要作用^[18],而且其较大根系生长旺盛有助于提高其中后期的抗倒伏能力。

4 结论

玉米根系由直径 ≤ 1 mm、直径在1~2 mm以及直径 > 2 mm的根系组成。其中直径 ≤ 1 mm的不定根系的长度、面积及体积分别占总根系80%、50%及20%以上,是根系吸收水肥的主要区域。不同氮肥运筹对玉米根系具有不同的影响。重基肥处理增加根系生物总量,有利于提高水肥的摄取。适当少量施入基肥,适量增加穗肥则有利于促进生育后期根系下扎,提高根系健壮程度。不同株型玉米品种根系的生长趋势具有显著差异。披散型品种在生育前期根系生长量均显著高于紧凑型品种,在生育后期紧凑型品种根系的生长量均高于披散型品种,后期根系生长较披散型品种旺盛。紧凑型品种根系构型的变化较披散型玉米品种更有利于玉米生长及产量的建成。

参 考 文 献

- [1] 董桂春,王余龙,吴华,等.水稻主要根系性状对施氮时期反应的品种间差异[J].作物学报,2003,29(06):871-877
- [2] 张成良,姜伟,肖叶青,等.水稻根系研究现状与展望[J].江西农业学报,2006,18(5):23-27
- [3] 孙静文,陈温福,臧春明,等.水稻根系研究进展[J].沈阳农业大学学报,2003,33(6):466-470
- [4] 朱德峰,林贤青,曹卫星.超高产水稻品种的根系分布特点[J].南京农业大学学报,2000,23(4):5-8
- [5] 吴朝晖,周建群,青先国,等.水稻根系研究的现状及展望[J].湖南农业科学,2008(6):21-24
- [6] Ketcheson J. Conservation tillage in eastern Canada[J]. Journal Soil Water Conservation,1977,32(1):57-60
- [7] 彭云峰,张吴平,李春俭.不同氮吸收效率玉米品种的根系构型差异比较:模拟与应用[J].中国农业科学,2009,42(03):843-853
- [8] 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
- [9] Berntson G M. Topological scaling and plant root system architecture:Developmental and functional hierarchies[J]. New

- Phytol, 1997, 135(4): 621-634
- [10] 鄂玉江, 戴俊英, 顾慰连. 玉米根系的生长规律及其与产量关系的研究 I 玉米根系生长和吸收能力与地上部分的关系 [J]. 作物学报, 1988, 14(2): 149-154
- [11] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响 [J]. 作物学报, 2013, 39(8): 1445-1451
- [12] 李双双, 李晶, 陈龙涛, 等. 施氮量对春小麦根系生长及产量的影响 [J]. 麦类作物学报, 2013, 33(1): 141-145
- [13] 凌启鸿, 凌励. 水稻不同层次根系的功能及对产量形成作用的研究 [J]. 中国农业科学, 1984, 47(5): 3-11
- [14] 刘胜群, 宋凤斌. 玉米初生根和不同层次次生根的直径和大量元素含量的比较分析 [J]. 植物资源与环境学报, 2009, 18(4): 9-15
- [15] 杨兆生, 阎素红, 王俊娟, 等. 不同类型小麦根系生长发育及分布规律的研究 [J]. 麦类作物学报, 2000, 20(1): 47-50
- [16] 熊淑萍, 王小纯, 李春明, 等. 冬小麦根系时空分布动态及产量对不同氮源配施的响应 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(7): 759-768
- [17] Forde B G, Lorenzo H. The nutritional control of root development [J]. Plant Soil, 2001, 232(1/2): 51-68
- [18] 黄高宝, 张恩和, 胡恒觉. 不同玉米品种氮素营养效率差异的生态生理机制 [J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(3): 293-297

责任编辑: 袁文业