

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190307

周芳, 程秋博, 金容, 杜伦静, 李小龙, 陈祥, 刘斌祥, 袁继超, 孔凡磊. 种子大小与播种深度对川中丘陵区玉米根系生长的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1799–1811

ZHOU F, CHENG Q B, JIN R, DU L J, LI X L, CHEN X, LIU B X, YUAN J C, KONG F L. Effects of kernel size and sowing depth on maize root growth in the middle Sichuan hilly area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(12): 1799–1811

种子大小与播种深度对川中丘陵区 玉米根系生长的影响*

周芳¹, 程秋博², 金容¹, 杜伦静¹, 李小龙¹, 陈祥¹,
刘斌祥¹, 袁继超^{1**}, 孔凡磊¹

(1. 四川农业大学农学院/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室/作物生理生态及栽培四川省重点实验室 成都 611130; 2. 苍溪县农业局 广元 628400)

摘要: 为解决川中丘陵区机播质量差、季节性干旱频发危害玉米生长现象, 本试验以该地区主推玉米品种‘正红 505’为材料, 采用裂区设计, 通过田间及盆栽试验, 研究不同种子大小及播种深度对玉米苗期、穗期根系生长及分布的影响, 以期为本区域玉米的机械化精量播种和抗旱栽培提供理论依据。结果显示: 1) 种子越大发芽率越高; 适当浅播(2~6 cm)能显著提高发芽率, 2 cm 较 10 cm 播深发芽率提高 6.5%。2) 大粒种子的根长、表面积、体积及干重极显著大于小粒种, 虽然随生育进程推进, 大、小粒种间根系生长的差异逐渐缩小, 但至吐丝期, 大粒种子的根长、表面积、体积及干重仍较小粒种分别高 28.6%、25.0%、22.4%和 11.4%。3) 三叶期 2 cm 与 6 cm 播深的根系较 10 cm 播深下根长、表面积、体积及干重显著更高, 但之后 10 cm 播深的根系生长更快, 五叶期一七叶期后, 超过 2 cm 播深的玉米; 至吐丝期, 10 cm 播深玉米根长、表面积、体积和干重较 2 cm 浅播处理分别提高 17.1%、11.9%、14.0%和 10.4%, 差异均达显著水平。4) 种子大小对根系的分布影响较小, 但播种深度对根系分布影响显著。10 cm 播深较 2 cm 浅播处理可显著提高 10 cm 以下土层玉米根系的分布。5) 种子越大, 产量越高, 大、中粒种子较小粒种子玉米产量分别提高 9.1%和 7.3%($P < 0.05$); 适当深播(6~10 cm)能有效增加产量, 6 cm、10 cm 播深玉米产量较 2 cm 播深产量分别提高 11.8%、26.3%。研究结果表明玉米大粒种子有利于建成发达的根系, 适当深播有利于中、后期根系的生长和增加深层土壤的分布, 从而提高玉米水肥吸收能力, 提高其抗旱性, 最终达到提高产量的目的。因此, 川中丘陵区应选大中粒种并适当深播。

关键词: 玉米; 种子大小; 播种深度; 根系发育; 根系分布

中图分类号: S5-33

文章编号: 2096-6237(2019)12-1799-13

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Effects of kernel size and sowing depth on maize root growth in the middle Sichuan hilly area*

ZHOU Fang¹, CHENG Qiubo², JIN Rong¹, DU Lunjing¹, LI Xiaolong¹, CHEN Xiang¹, LIU Binxiang¹,
YUAN Jichao^{1**}, KONG Fanlei¹

(1. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University / Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in

* 国家重点研发计划项目(2016YFD0300307, 2016YFD0300209)资助

** 通信作者: 袁继超, 主要从事作物高产栽培技术研究。E-mail: yuanjichao5@163.com

周芳, 主要从事作物高产栽培研究。E-mail: zhoufang0223@163.com

收稿日期: 2019-04-22 接受日期: 2019-09-18

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2016YFD0300307, 2016YFD0300209).

** Corresponding author, E-mail: yuanjichao5@163.com.

Received Apr. 22, 2019; accepted Sep. 18, 2019

Southwest China, Ministry of Agriculture / Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, China; 2. Cangxi County Agricultural and Rural Bureau, Guangyuan 628400, China)

Abstract: Poorly executed mechanized seeding and frequent occurrence of seasonal drought in the hilly areas in middle Sichuan compresses the growth of maize. Using the main cultivar for this region, ‘Zhenghong505’, and adopting a split zone design with field and pot experiments, the effects of different kernel sizes and sowing depths on the growth and distribution of roots at the seeding and ear stages of maize were studied to provide a theoretical basis for mechanized precision sowing and drought-resistant cultivation of maize in this region. The results were as follows: 1) Larger kernels and an appropriate shallow sowing depth (2–6 cm) can both significantly increase the germination rate. Compared with deep sowing (10 cm), the germination rate under shallow sowing (2 cm) increased by 6.5%. 2) The length, surface area, volume, and dry weight of roots arising from large kernels were significantly greater than those from small kernels. Although the differences in root growth gradually reduced with the growth process, the length, surface area, volume, and dry weight of the roots were still 28.6%, 25.0%, 22.4%, and 11.4% higher, respectively, than for small kernels at the silking stage. 3) At the 3-leaf stage, the root length, surface area, volume, and dry weight of roots arising from kernels planted at 2 cm and 6 cm were significantly higher than for those sowed at 10 cm depth, and these parameters for roots from kernels planted at 10 cm surpassed those for kernels planted at 2 cm by the 5–7-leaf stage. The length, surface area, volume, and dry weight of the roots arising from kernels planted at 10 cm at the silking stage were significantly higher (17.1%, 11.9%, 14.0%, and 10.4%, respectively) than those at the 2 cm sowing depth, and the roots in the 10–20 cm soil layer contributed to an increase in yield. 4) Kernel size had little effect on root distribution, but a sowing depth of 10 cm increased the root distribution rate in soil layers below 10 cm. 5) Yields from large and medium kernels were significantly higher (9.1% and 7.3%, respectively) than those from small kernels. Deep sowing effectively increased yields by 11.8% at 6 cm depth and 26.3% at 10 cm sowing depth compared with sowing at 2 cm. Large kernels were conducive to the establishment of well-developed roots, whereas sowing at an appropriate depth was conducive to the growth and downward distribution of roots in the middle and late stages, thereby increasing their water absorption capacity and drought resistance, ultimately achieving the increase in yield. Therefore, when planting maize, large and medium kernels should be selected and sown deeper appropriately.

Keywords: Maize; Kernel size; Sowing depth; Root development; Root distribution

根系是植物吸收水肥的重要器官,并在植株感受外界信号变化及信息交流上发挥极其重要的作用,它不仅能将接受到的环境信号传递到地上部使其做出调整,更重要的是能够调整自身的形态结构和空间分布以适应外界环境变化,达到优化资源利用效率、帮助植株躲避不良环境的目的^[1-3],因此建立发达而合理分布的根系是作物高产的基础。机械化是实现现代农业的基础,机械化播种则是实现玉米(*Zea mays*)机械化的首要条件^[4-5]。川中丘陵地区作为四川省玉米主产区,由于种子分级不明确,机播技术不成熟、不规范导致机械化质量低下^[6],适宜的播种深度仍不明确。同时本地区季节性干旱频发且严重,在常规播种深度(3~5 cm)下,玉米生长易遭受干旱从而危害生长^[7-10]。因此,如何提高机播质量、有效抵御季节性干旱胁迫是当前川中丘陵区夏玉米生产中急需解决的问题。

种子质量是影响机播质量的重要因素之一。前人就发芽率、种子纯度等进行了大量研究,但就种子大小的研究仍较少^[11-12]。种子大小能直接影响下种量,进而影响播种效率,导致后期生长不一致等诸多问题出现^[13]。种子大小是衡量玉米种子商品质

量、机械化精量播种的重要指标之一。目前市场上多用体积法来进行大小分级,即玉米种子大小(粒·L⁻¹)=容重(g·L⁻¹)/百粒重×100%。大种子则意味着储存物质更多,在种子生长发育过程中能提供更多的营养物质,建苗能力更强、幼苗生长更旺盛^[13-15]。随生育进程推进,虽不同大小种子间差异会减小,但大粒种子后期形成植株更大,根系也更发达^[16]。播深不同,种子所处的土壤墒情也各不相同,表层土壤疏松多孔易受外界因素影响,尤其在夏季高温少雨条件下易失水干旱,因此播种过浅易导致种子缺水发育不良。随播种深度加大,土壤保温保水能力逐渐提高,但深层土壤紧实孔隙度小,无法提供足够的氧气供种子生长,同时土壤阻力较大,种子生长发育缓慢,尤其是种粒较小时,种子本身无法提供足够的营养使幼苗破土而出^[10,17]。因此播种深度要适宜,但适宜的播深可能因生态条件而异^[18-20],并在一定程度上受种子大小的影响。前人的研究大多探讨种子大小或播种深度对玉米幼苗地上部生长发育的影响,缺少种子大小和播种深度对玉米根系形态及分布影响方面的研究报道,尤其是二者互作

效应方面。本文通过盆栽和田间试验, 深入探讨种子大小与播种深度对不同生育时期根系形态与分布的影响, 以期为玉米根系的合理构建和抗旱高产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

大田试验于2015年5月—2016年9月在四川省德阳市中江县合兴乡新建村进行, 盆栽试验于2016年4—5月在四川农业大学成都校区抗旱棚进行。试验供试土壤为紫色黏性土壤, 盆栽试验取自田间试验田。2015年土壤基础肥力: 有机质 $12.77 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.47 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $52.93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 $15.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $117.56 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 2016年土壤基础肥力: 有机质

$9.44 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.01 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $45.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 $4.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $86.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验期间气候条件

2015 年和 2016 年玉米生长期总降雨量分别为 336.2 mm、366.7 mm, 较前 5 年平均减少 34.9%、29.0%(图 1), 表明两年均发生了不同程度的季节性干旱。2015 年 5 月下旬—6 月上旬的苗期、6 月底—8 月上旬的玉米幼穗分化至籽粒灌浆期间降雨较少; 2016 年播后降雨量充足, 干旱主要集中在 6 月中、下旬(夏旱)和 7、8 月份(伏旱)。

干旱发生的同时还伴随连续的高温天气, 2015 年和 2016 年玉米生长期间的日均温度(分别为 25.65 和 26.59)均高于多年(2010—2014 年)平均水平(25.27)。

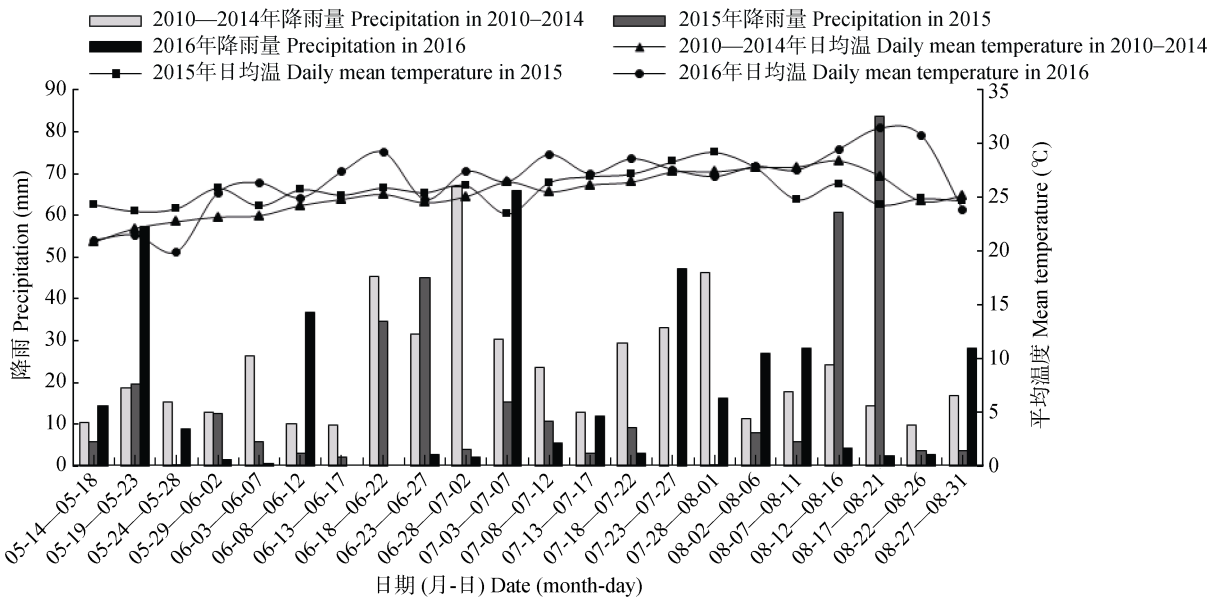


图 1 田间试验期间降水量和日均温度

Fig. 1 Precipitation and daily mean temperature during the field experiment

1.3 试验材料

供试品种为四川农业大学正红生物技术有限责任公司提供的‘正红 505’, 为当地主推品种, 用不同孔径的种子筛进行加工, 得到不同大小试验材料(表 1)。

1.4 试验设计

1.4.1 盆栽试验

采用两因素完全随机设计, A 因素为种子大小, A_1 — A_3 分别表示大、中、小粒种子。B 因素为播种深

度, B_1 — B_3 分别表示 2 cm、6 cm、10 cm 播深, 播种在内径 20 cm、高 30 cm 的普通花盆中, 共 9 个处理, 6 次重复, 共计 54 盆。将土壤风干, 研磨后过 5 mm 筛并去除杂物。将土壤装至相应深度后, 在相应编号盆中均匀铺放大、中、小种 20 粒, 然后覆土至相应播种深度(每盆的总装土量基本一致), 之后每盆喷水 1.25 L 使土壤相对含水量统一达 60%(称重法测量), 试验期间视情况浇水, 以防止幼苗萎蔫。三叶

表 1 供试不同大小玉米‘正红 505’种子的粒径和千粒重

Table 1 Diameter and 1000-grain weight of the tested maize seeds with different sizes

大粒种 Large kernel		中粒种 Medium kernel		小粒种 Small kernel	
直径 Diameter (mm)	千粒重 1000-grain weight (g)	直径 Diameter (mm)	千粒重 1000-grain weight (g)	直径 Diameter (mm)	千粒重 1000-grain weight (g)
≥ 9.3	349.16	7.5~7.7	266.53	≤ 6.0	171.40

期取样前选择晴好天气,将温度计插入 2 cm、6 cm、10 cm 相应土层,测定日出(8:00)后 10 h 内土壤温度,每 2 h 记录一次。对应 2 cm、6 cm、10 cm 播深处理分别取 0~4 cm、4~8 cm 及 8~12 cm 土层土壤,混匀后装入铝盒中,并用烘干法测定土壤含水量。在三叶期、五叶期和七叶期,每次从各处理两盆中选出长势均匀的 10 株样品根系,清洗后用根系扫描仪(Epson Perfection V700)扫描根系样品,再用根系分析软件(Epson Expression 1000xl, WinRHIZO)分析测定根体积、根表面积、根长。然后将相应根系放入牛皮纸袋内,置 105 ℃ 烘箱杀青 30 min, 80 ℃ 烘干至恒重并称量。

1.4.2 田间试验

采用裂区试验设计,3 次重复。主区为种子大小, A₁、A₂ 和 A₃ 分别表示大、中和小粒种子;副区为播种深度, B₁、B₂ 和 B₃ 为别表示 2 cm、6 cm 和 10 cm 播深。小区面积为 5.5 m×3.2 m=17.6 m²,株行距为 (1.1 m+0.5 m)×0.25 m,种植密度为 50 000 株·hm⁻²。采用中沟施肥(条施)的方法,播前施底(基)肥,吐丝后追施穗肥,底肥 追肥=1 1,共施复合肥 900 kg·hm⁻²(有效含量 40%, N P K=25 7 8)。其他栽培管理措施与当地高产栽培一致。

1)于三叶期、五叶期和七叶期每小区取 5 株完整根系,用根系扫描仪测定根长、根表面积、根体积并烘干至恒重后测定干重,方法同上。

2)于拔节、大喇叭口、吐丝期选取长势一致连

续的玉米两株,每小区选取两组共 4 株,采用剖面取根法,以株行距中间位置为水平方向,以土层表面为基准垂直向下,0~10 cm、10~20 cm 和 20~40 cm 3 个土层取包含玉米整个根系土块,选出全部根系后测定根长、根表面积、根体积及干重,方法同上。

3)收获前,统计每个小区有效穗数和双苞率,然后按小区实收计产。

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2013 进行数据处理,运用 SPSS 19.0 软件进行不同处理间的统计分析 & 差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同土层水分和温度变化

土壤水分及温度是影响种子萌发及生长发育的重要条件。如图 2A 所示,2 cm 土层含水量显著 ($P<0.05$) 低于 6 cm 和 10 cm 土层,表明深层土壤较表层土壤的保水保墒能力更强。

如图 2B 所示,全天不同土层温度变化与大气温度变化一致,均表现为先上升后下降的趋势。上午 8:00 以 2 cm 土层温度最低,10 cm 土层最高;至 12:00—14:00,2 cm 土层温度升至最高,而 10 cm 温度最低。表明一天中 2 cm 土层温差最大,10 cm 温差最小,表层土壤更容易受到气温的影响,深层土壤具有更好的保温、恒温的效果,更有利于种子的萌发生长。

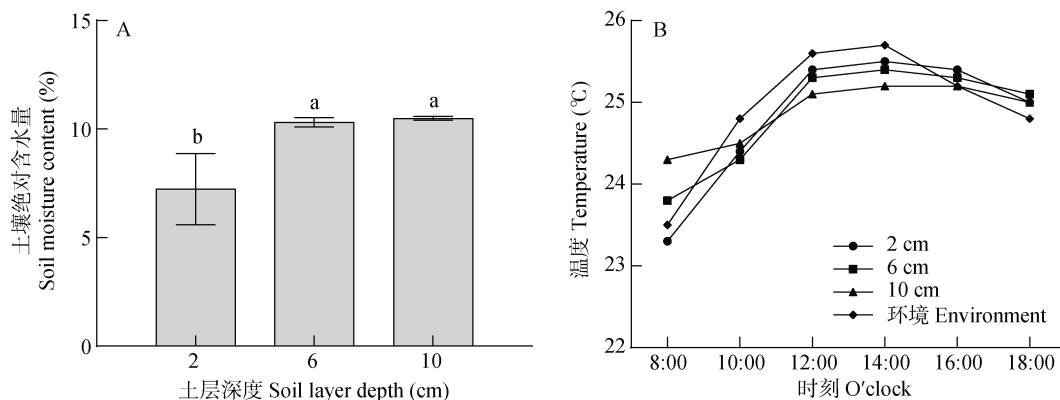


图 2 盆栽试验不同深度土壤含水量及日间温度的变化

Fig. 2 Soil moisture and daily temperature change in different depths of soil layer in the pot experiment 不同字母表示不同土层差异显著 ($P<0.05$). Different lowercase letters mean significant differences at $P<0.05$ according to LSD test.

2.2 种子大小与播种深度对田间发芽率的影响

种子发芽率是衡量种子自身条件及环境是否合适的重要指标之一。从图 3 可知,大、中粒种的发芽率极显著 ($P<0.01$) 高于小粒种,分别较小粒种高 7.0%、9.7%。不同大小种子则均表现深播显著降低

了发芽率,3 个籽粒大小播深 10 cm 下发芽率较 2 cm、6 cm 分别平均下降 12.8%、10.3%,其中小粒种配合深播(10 cm)条件下,发芽率不足 3/4,播种过深由于土壤板结通气性差、出苗阻力大且破土过程中消耗养分过多,导致发芽率大幅度下降,尤其是小

粒种储藏养分较少、顶土能力弱, 深播条件下发芽率下降幅度最大, 这也表明了大、中粒种环境适应能力较小粒种更强、大粒种较小粒种更耐深播。

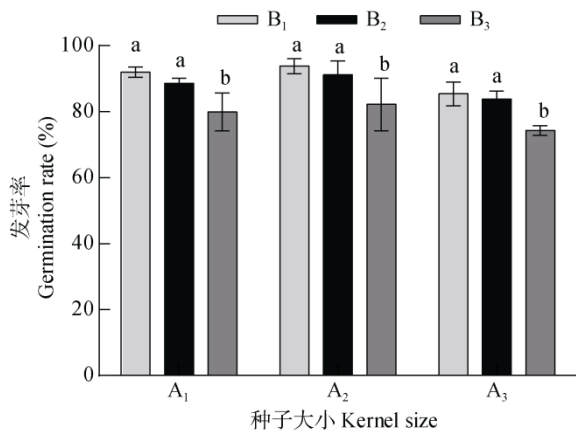


图 3 籽粒大小与播种深度对玉米发芽率的影响(2016 年田间试验)

Fig. 3 Effects of kernel size and sowing depth on emergence rate of maize (field experiment in 2016)

A₁、A₂ 和 A₃ 分别代表大、中、小粒种子, B₁、B₂ 和 B₃ 分别代表 2 cm、6 cm、10 cm 播种深度。不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。A₁、A₂ and A₃ respectively represent large kernel, medium kernel and small kernel; B₁、B₂ and B₃ respectively represent 3 sowing depth (2 cm, 6 cm, 10 cm). Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

2.3 种子大小和播种深度对根系形态的影响

2.3.1 对苗期根系形态的影响

如表 2 所示, 种子大小显著 ($P < 0.05$) 影响根系形态特征, 各时期均以大粒种根系最大, 小粒种根系最小。3 个时期 3 个播深处理, 平均大粒种根长、表面积、体积较中粒种分别增加 9.2%、13.3% 和 18.2%, 较小粒种增加 24.7%、30.2% 和 33.0%。表明大粒种的根系较小粒种更发达, 这可能与其贮藏营养物质更多有关; 且随着生育期的推进, 各处理间根系不断生长, 各形态指标也逐渐增大, 其中以大粒种增幅最大, 七叶期较三叶期根长、表面积、体积分别增加了 292.4%、416.2% 和 631.8%, 表明大粒种苗期根系的生长也较小粒种更快。播种深度在整个苗期对根系形态指标的影响达极显著水平 ($P < 0.01$)。三叶期不同大小种子的根系形态均在播深为 6 cm 时达最大值, 其根长、表面积及体积较播深 2 cm 幼苗分别提高 37.85%、26.90% 和 19.75%, 2 cm 播深又较 10 cm 播深分别高 20.8%、26.9% 和 34.2%。但之后深播种子的根系生长发育更快, 逐渐超过浅播处理, 至七叶期时播深 10 cm 的根长、表面积及体积较 2 cm 播深分别提高 10.5%、11.3%、15.2%, 较 6 cm 播深提高 5.3%、4.6%、4.3%。这表明, 深播不利于出苗初

期根系的建成, 但有利于之后的根系生长, 这可能与深层土壤水分含量更高有关。2016 年田间试验结果(略)、盆栽试验结果(表 3)与 2015 年田间试验基本一致, 但由于盆栽试验水分可控, 土壤水分更充分, 至五叶甚至七叶期时, 根系最优值均出现在播深 6 cm 处。

2.3.2 对穗期根系形态的影响

随生育时期推进, 种子大小对根系形态影响程度逐渐减弱, 但大喇叭口、吐丝期大粒种的根系形态仍表现出一定的优势。如表 4 所示, 两年中 3 个播深平均表现为: 大喇叭口期大粒种的根长、表面积和体积分别较小粒种高 20.1%、18.0% 和 16.2%, 较中粒种提高 5.0%、9.8% 和 4.5%。吐丝期大粒种根长、表面积和体积较小粒种提高 28.6%、25.0% 和 22.4%, 较中粒种提高 8.8%、3.0% 和 4.7%。大、中粒种间差异较小, 未达显著水平, 表明选用大、中粒种仍然是建立玉米中、后期强大根系的基础。

播种深度对玉米中、后期根系的形态也有一定影响, 尤其在吐丝期可达极显著 ($P < 0.01$) 水平, 总体表现为 10 cm 播深下植株根系更发达, 根长、表面积更大, 2 cm 播深下则最小。两年中 3 个粒种平均, 吐丝期 10 cm 播深的根长、表面积及体积较 2 cm 提高 17.1%、11.9% 和 14.0%, 较 6 cm 播深下提高 6.9%、4.6% 和 3.1%。

两年数据平均, 大喇叭口至吐丝期大、中粒种在 10 cm 播深下各形态指标增加量、增幅均最大, 10 cm 播深下大粒种较小粒种根长、表面积及体积增加 32.2%、30.8% 及 31.2%, 中粒种则较小粒种高 9.9%、32.0% 及 16.9%, 不同大小粒种均在 2 cm 播深下增加量最小, 且增幅略小于其余播深。表明中、后期大、中粒种在深播条件下根系更粗壮、表面积更大, 更能有效吸收土壤水肥以供植株生长。

2.4 对不同生育期根系干重的影响

根的干重是衡量其发达程度的重要指标^[21]。从图 4 可以看出, 随着生育进程推进, 根系干重呈先缓慢后迅速上升的趋势。种子大小对根系干重有着极显著 ($P < 0.01$) 的影响, 大粒种根系干重最大, 中粒种次之, 小粒种最小, 处理间差异随生育进程推进呈降低趋势。两年 3 个播深平均, 三叶期、五叶期、七叶期、大喇叭口期及吐丝期的平均单株根重大粒种较小粒种分别高 73.5%、68.8%、28.5%、17.4% 和 11.4%, 中粒种较小粒种相应的增幅分别为 69.2%、49.5%、8.7%、4.3% 及 8.2%, 其中 2016 年种子大、小粒间的差异总体较 2015 年大。

表 2 种子大小与播种深度对玉米苗期地下形态的影响(2015 年大田)

Table 2 Effects of kernel size and sowing depth on underground part shape of maize seedlings (field experiment in 2015)

处理 Treatment	三叶期 Three-leaf stage			五叶期 Five-leaf stage			七叶期 Seven-leaf stage			
	根长	根表面积	根体积	根长	根表面积	根体积	根长	根表面积	根体积	
	RL (cm)	RSA (cm ²)	RV (cm ³)	RL (cm)	RSA (cm ²)	RV (cm ³)	RL (cm)	RSA (cm ²)	RV (cm ³)	
A ₁	B ₁	103.1b	29.4a	0.63a	209.3b	68.8b	1.93b	395.1b	139.9b	4.0b
	B ₂	133.5a	34.2a	0.70a	229.3a	79.6a	2.36a	406.5b	150.0a	4.5a
	B ₃	86.0c	23.3b	0.46b	236.3a	79.6a	2.49a	464.4a	158.7a	4.6a
	平均 Average	107.5a	29.0a	0.60a	224.9a	76.0a	2.30a	422.0a	149.5a	4.4a
A ₂	B ₁	94.6b	27.1a	0.62a	193.8b	62.7b	1.84b	370.8b	126.1b	3.3b
	B ₂	128.9a	33.1a	0.68a	201.2ab	70.5a	2.01ab	406.1a	130.3ab	3.4ab
	B ₃	67.2c	17.2b	0.36b	213.0a	69.7a	2.22a	397.3a	137.2a	3.9a
	平均 Average	96.9b	25.8a	0.55a	202.7b	67.6a	2.02b	391.4ab	131.2b	3.5b
A ₃	B ₁	71.5b	17.1b	0.32b	141.0c	50.0a	1.40a	351.3a	114.0b	3.2a
	B ₂	108.7a	26.1a	0.5b	183.7a	56.7a	1.75a	359.3a	124.0ab	3.7a
	B ₃	69.6b	17.5b	0.35b	157.3b	54.0a	1.47a	372.8a	127.1a	3.6a
	平均 Average	83.2c	20.2b	0.39b	160.6c	53.5b	1.54c	361.1b	121.7b	3.5b
F 值	A	25.8**	20.2**	52.6**	46.6**	21.7**	63.0**	8.6*	14.9*	28.1**
F value	B	46.0**	24.3**	27.0**	20.1**	12.0**	6.6*	12.0**	11.5**	8.1**
	A × B	1.2	1.8	3.7*	5.3*	0.6	1.4	3.6	0.4	1.0

RL: 根长; RSA: 根表面积; RV: 根体积。A₁、A₂和 A₃ 分别代表大、中、小粒种子, B₁、B₂和 B₃ 分别代表 2 cm、6 cm、10 cm 播种深度。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。*和**分别代表在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。RL: root length; RSA: root surface area; RV: root volume. A₁, A₂ and A₃ respectively represent large kernel, medium kernel and small kernel; B₁, B₂ and B₃ respectively represent 3 sowing depth (2 cm, 6 cm, 10 cm). Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). * and ** indicated the significant level at 0.05 and 0.01, respectively.

表 3 种子大小与播种深度对玉米苗期地下形态的影响(盆栽试验)

Table 3 Effects of kernel size and sowing depth on underground part shape of maize seedlings (pot experiment)

处理 Treatment	三叶期 Three-leaf stage			五叶期 Five-leaf stage			七叶期 Seven-leaf stage			
	根长	根表面积	根体积	根长	根表面积	根体积	根长	根表面积	根体积	
	RL (cm)	RSA (cm ²)	RV (cm ³)	RL (cm)	RSA (cm ²)	RV (cm ³)	RL (cm)	RSA (cm ²)	RV (cm ³)	
A ₁	B ₁	737.2a	108.5a	1.36a	982.6b	170.1b	2.35b	1 597.0b	339.7a	5.56a
	B ₂	688.9a	108.1a	1.35a	1 341.1a	229.9a	3.27a	1 707.1a	348.3a	6.00a
	B ₃	660.9a	101.9a	1.25b	1 317.6a	232.6a	3.18a	1 710.4a	346.3a	5.89a
	平均 Average	695.7b	106.2b	1.32b	1 213.8a	210.9a	2.93a	1 671.5a	344.7a	5.81a
A ₂	B ₁	819.8a	116.6a	1.44a	983.7b	163.6b	2.17b	1 708.3a	351.3a	6.25a
	B ₂	806.0a	121.6a	1.46a	1 265.4a	224.9a	3.20a	1 766.0a	353.1a	6.22a
	B ₃	811.4a	120.4a	1.39a	1 217.4a	217.9a	3.11a	1 490.5b	343.2a	5.74a
	平均 Average	812.4a	119.7a	1.43a	1 155.5ab	202.1ab	2.83a	1 654.9a	349.2a	6.07a
A ₃	B ₁	743.3a	102.5a	1.13a	875.1b	145.7b	1.94b	1 316.7a	282.3a	4.68a
	B ₂	650.0a	94.3a	1.09a	1 193.7a	216.5a	3.20a	1 271.6a	285.5a	5.18a
	B ₃	475.8b	76.6b	0.98b	1 183.0a	214.4a	3.09a	1 127.9b	265.8a	5.08a
	平均 Average	623.0c	91.2c	1.07c	1 084.0b	192.2b	2.75a	1 238.7b	277.9b	5.00b
F 值	A	50.8**	169.8**	66.0**	11.1*	10.4*	0.6	104.4**	14.7*	10.6*
F value	B	6.8*	2.8	8.7**	76.6**	85.4**	24.7**	9.4**	0.3	0.7
	A × B	3.1	1.9	0.5	0.6	0.4	0.2	6.1**	0.1	0.6

RL: 根长; RSA: 根表面积; RV: 根体积。A₁、A₂和 A₃ 分别代表大、中、小粒种子, B₁、B₂和 B₃ 分别代表 2 cm、6 cm、10 cm 播种深度。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。*和**分别代表在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。RL: root length; RSA: root surface area; RV: root volume. A₁, A₂ and A₃ respectively represent large kernel, medium kernel and small kernel; B₁, B₂ and B₃ respectively represent 3 sowing depth (2 cm, 6 cm, 10 cm). Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). * and ** indicated the significant level at 0.05 and 0.01, respectively.

表 4 种子大小与播种深度对玉米中后期根系形态的影响(2015 年和 2016 年大田试验)

Table 4 Effects of kernel size and sowing depth on root morphology of maize at medium-late growth stage (field experiment in 2015 and 2016)

处理 Treatment	2015						2016						
	大喇叭口期 Bell mouthed stage			吐丝期 Silking stage			大喇叭口期 Bell mouthed stage			吐丝期 Silking stage			
	根长 RL (cm)	根表面 积 RSA (cm ²)	根体积 RV (cm ³)	根长 RL (cm)	根表面 积 RSA (cm ²)	根体积 RV (cm ³)	根长 RL (cm)	根表面 积 RSA (cm ²)	根体积 RV (cm ³)	根长 RL (cm)	根表面 积 RSA (cm ²)	根体积 RV (cm ³)	
A ₁	B ₁	6 875.6a	1 313.5b	24.0a	16 024.7c	3 853.7b	83.4c	4 908.4a	1 093.4b	26.0ab	10 722.6b	2 626.5b	63.5b
	B ₂	7 149.8a	1 464.2a	24.7a	17 081.9b	4 100.3ab	87.7b	4 791.6a	1 176.5a	26.8a	12 345.4a	2 811.6ab	70.0a
	B ₃	6 947.7a	1 426.1a	21.0b	18 949.1a	4 344.4a	93.4a	4 812.8a	1 155.8a	25.6b	13 532.1a	2 942.8a	76.4a
	平均 Average	6 991.0a	1 401.3a	23.2a	17 351.9a	4 099.5a	88.2a	4 837.6a	1 141.9a	26.1a	12 200.1a	2 793.6a	70.0a
A ₂	B ₁	6 493.4ab	1 102.7b	20.6a	15 097.7b	3 960.6a	80.1a	4 828.6a	1 088.1b	25.0b	11 034.9a	2 508.2a	61.2b
	B ₂	6 840.5a	1 372.3a	22.2a	15 683.9ab	4 061.3a	83.3a	4 822.0a	1 174.1a	26.7a	11 644.3a	2 590.0a	71.7a
	B ₃	6 120.1b	1 127.6b	20.8a	16 435.4a	4 241.0a	83.5a	4 690.5a	1 085.8b	26.4a	11 600.3a	2 721.1a	73.5a
	平均 Average	6 484.7b	1 200.9b	21.2b	15 739.0ab	4 087.6a	82.3a	4 780.3a	1 116.0a	26.0a	11 426.5a	2 606.4b	68.8a
A ₃	B ₁	5 502.8b	976.1b	20.1a	11 355.0b	2 970.4b	62.6b	4 160.5a	981.6a	20.9b	8 951.4b	2 053.3a	54.3b
	B ₂	6 238.4a	1 309.0a	21.7a	12 645.1b	3 416.3ab	68.9a	4 103.3a	936.0a	23.4a	10 767.7a	2 239.3a	66.6a
	B ₃	5 475.9b	1 307.6a	20.1a	15 109.7a	3 575.1a	74.0a	4 067.1a	956.5a	21.2b	10 109.8ab	2 286.0a	61.2ab
	平均 Average	5 739.0c	1 197.6b	20.6b	13 036.6b	3 320.6b	68.5b	4 110.3b	958.0b	21.8b	9 943.0a	2 192.9c	60.7b
F 值 F Value	A	55.1**	14.2*	18.2**	5.4	6.2	9.1*	20.9**	11.2*	118.0**	2.0	43.5**	6.3
	B	7.0**	13.7**	8.4**	21.4**	5.5*	13.3**	0.5	4.0*	12.8**	7.0**	3.9*	12.8**
	A × B	0.9	2.4	1.8	0.5	0.3	1.3	0.1	5.3*	2.2	1.5	0.1	1.2

RL: 根长; RSA: 根表面积; RV: 根体积。A₁、A₂和 A₃ 分别代表大、中、小粒种子, B₁、B₂和 B₃ 分别代表 2 cm、6 cm、10 cm 播种深度。不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。*和**分别代表在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。RL: root length; RSA: root surface area; RV: root volume. A₁, A₂ and A₃ respectively represent large kernel, medium kernel and small kernel; B₁, B₂ and B₃ respectively represent 3 sowing depth (2 cm, 6 cm, 10 cm). Different lowercase letters indicate significant differences among treatments (P < 0.05). * and ** indicated the significant level at 0.05 and 0.01, respectively.

播种深度对玉米根系干重也有一定影响。总体表现为三叶期前浅、中播较好, 七叶期后则深播较好。两年 3 个不同大小种子三叶期、五叶期、七叶期、大喇叭口期和吐丝期平均单株根重 10 cm 播深较 2 cm 播深分别高-17.8%、12.5%、10.6%、6.0%及 10.4%, 6 cm 播深较 2 cm 播深的相应增幅分别为 4.4%、17.6%、4.3%、13.1%及 3.6%。

以大喇叭口至吐丝期为例, 两年数据平均, 相同时间内大、中粒种干物质增加量较小粒种提高 7.0%及 11.0%, 尤其是大、中粒种在 10 cm 播深下增加量最大, 在 2 cm 播深下增加量最小。表明大、中粒种在深播(10 cm)条件下更有利于中后期地下部生长, 根系更发达强壮。

2.5 种子大小与播种深度对根系干重分布的影响

图 5 显示, 两年田间试验均随土层深度增加, 各时期玉米根系的重量分配百分率均大幅度降低, 0~10 cm 土层根系干重的分布百分率(简称分布率)各处理平均为 77.4%~83.1%, 10~20 cm 土层分布率为 11.2%~15.3%, 20~40 cm 土层分布率为 4.2%~

7.3%, 可知根系主要集中在表层 10 cm 土壤内。但在盆栽试验(图 5E)七叶期时, 根系分布相对较深, 0~10 cm、10~20 cm 和 20 cm 以下土层根系干重的平均分布率分别为 40.4%、16.5%和 43.1%, 这可能与盆栽横向空间较小、土壤相对较疏松以及其保水性差从而导致根系下扎有关, 由此也表明盆栽条件下根系的生长与田间自然条件下的生长存在较大差异。

盆栽试验中, 大粒种的根系分布有表层化的趋势, 3 个播深平均, 大、中、小粒种 0~10 cm 土层根系分布率分别为 41.6%、40.8%、38.7%, 10~20 cm 土层的分布率分别为 17.4%、17.2%、15.0%, 而 20 cm 以下土层的分布率分别为 41.1%、42.0%、46.3%。而在田间试验中, 总体而言各层土壤中根系的干重均表现为大粒种>中粒种>小粒种, 但分布百分率则在不同种子大小间差异不显著。

播种深度对玉米根系的分布存在较大影响, 无论是盆栽或田间试验, 各生育时期根系干重在 0~10 cm 土层的分布百分率均表现出随播种深度增加而降低的趋势, 在 10~20 cm 及 20 cm 以下土层中的分布率

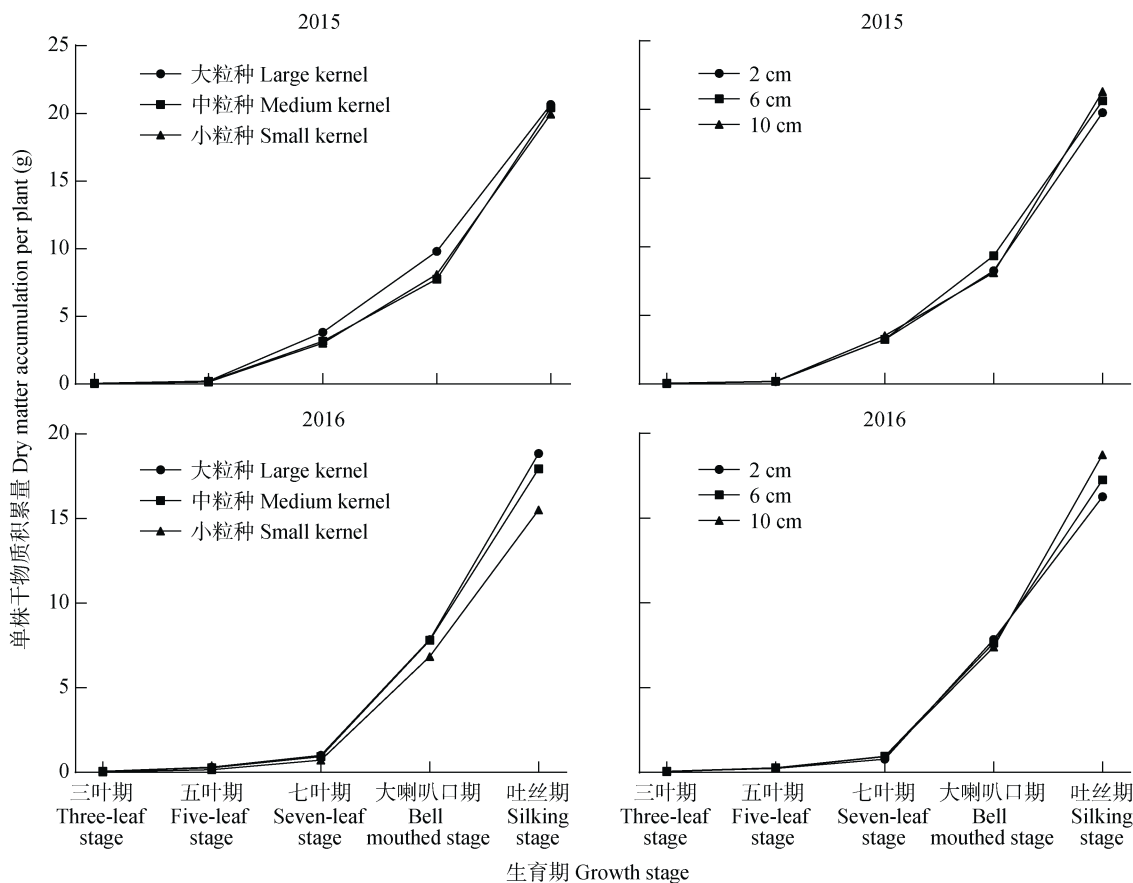


图 4 种子大小与播种深度对玉米不同生育期单株根系干重的影响(2015 年和 2016 年大田试验)

Fig. 4 Effects of kernel size and sowing depth on root dry matter per plant of maize at different growth stages (field experiment in 2015 and 2016)

则呈相反趋势,尤其是盆栽试验和田间试验的大喇叭口期,两年 3 个种子大小平均,大喇叭口期 2 cm、6 cm 和 10 cm 播深根重在 0~10 cm 土层的分布率分别为 82.2%、80.6%和 78.0%,在 10~20 cm 土层的分布率为 12.7%、14.1%和 15.2%,在 20 cm 以下土层的分布率为 5.1%、5.3%和 6.9%,这种趋势在大、中粒种中表现更为明显,由此表明,选用大中粒种适当深播是促进玉米根系下扎,提高根系在深层土壤中的分布率,从而提高其抗旱性的有效措施。

2.6 种子大小与播种深度对产量的影响

种子大小对产量有显著影响(图 6),3 个播深平均,大、中粒种较小粒种产量提高 9.1%、7.3%。播种深度对产量影响更为深远,达极显著($P<0.01$)水平,各粒种均在 10 cm 播深下产量最大,不同大小籽粒平均,6 cm、10 cm 较 2 cm 播深产量提高 11.8%、26.3%,可知适当的深播有利于各粒种提高产量。在中(6 cm)、深(10 cm)播条件下大粒种较小粒种产量提高 7.5%、9.8%,相同条件下中粒种较小粒种产量分别提高 9.3%、3.8%。由以上分析可知,中、大粒种尤其在适当的深播条件下增产效果明显。

2.7 玉米产量与吐丝期不同土层根系特性的相关性

吐丝后植株由营养生长逐渐转为生殖生长,根系持续为地上部提供土壤营养以保证籽粒灌浆形成产量。由表 5 可知,吐丝期各土层及总根系长、表面积、体积与干重均与产量呈正相关关系,其中全土层内的各根系指标与产量呈极显著($P<0.01$)的正相关关系,表明发达的根系是玉米高产的基础。就不同土层来看,以 10~20 cm 和 20~40 cm 土层的根干重和根表面积与产量的相关系数最高,表明增加 10 cm 以下土层的根干重和表面积有利于提高玉米产量。

3 讨论

机械化精量播种是玉米生产发展的必然趋势,而种子大小的选定是精量化播种的重要环节之一。一般认为,大粒种中含更多的营养物质,与小粒种相比,大粒种通常更具有萌发优势^[22-24]。这与其种子内贮藏营养物质数量和生理变化差异有关,大粒种淀粉降解速度明显快于小粒种,且成苗过程中 ATP 含量也高于小粒种^[25]。玉米苗期植株发育以根系生长为主,此时植株处于茎、叶分化期,加之外界

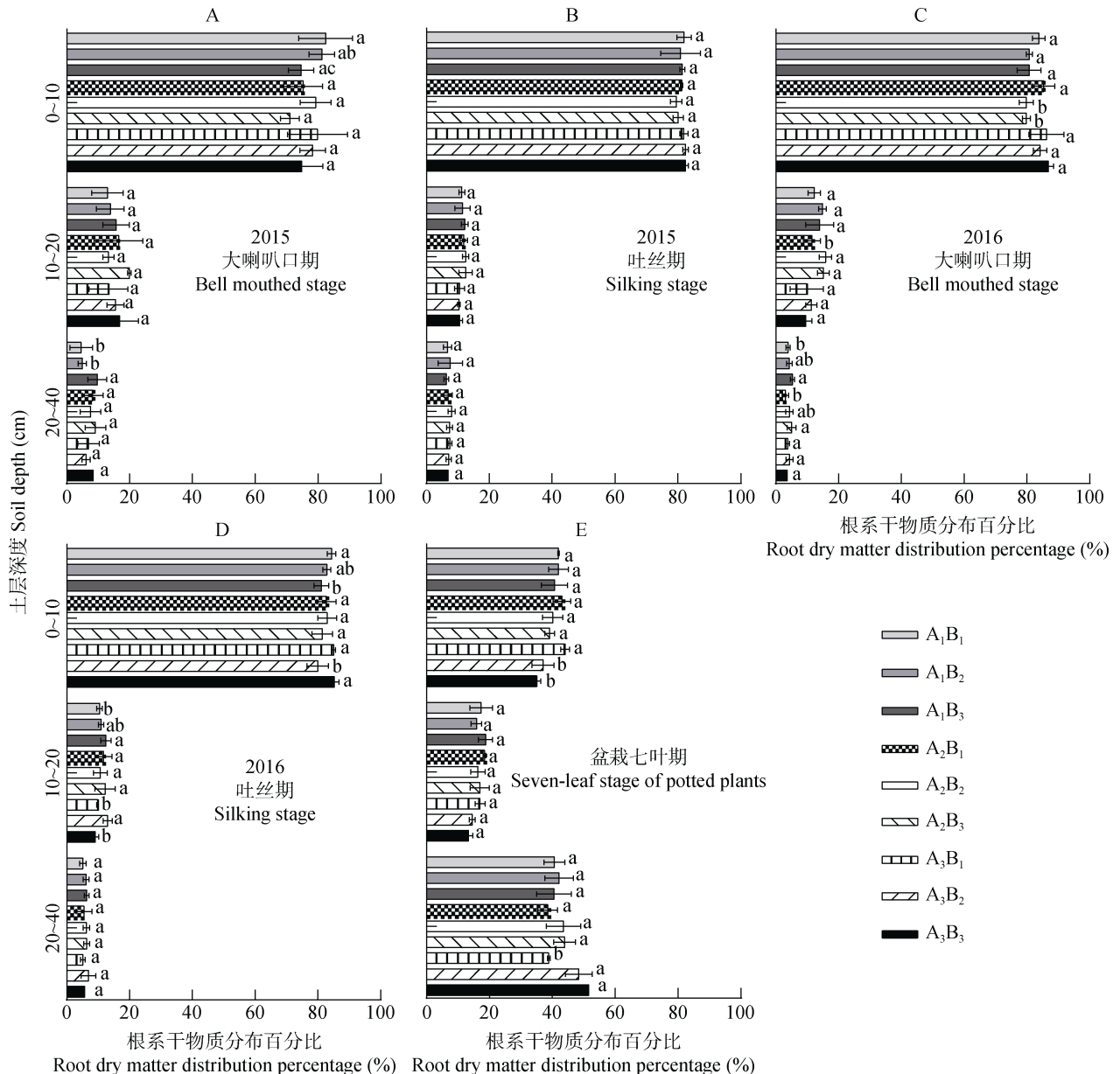


图 5 种子大小与播种深度对不同时期不同土层根系干物质分布百分比的影响

Fig. 5 Effects of kernel size and sowing depth on distribution of maize root dry matter in different soil layers in different periods A₁、A₂和 A₃分别代表大、中、小粒种子, B₁、B₂和 B₃分别代表 2 cm、6 cm、10 cm 播种深度。不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。A₁, A₂ and A₃ respectively represent large kernel, medium kernel and small kernel; B₁, B₂ and B₃ respectively represent 3 sowing depth (2 cm, 6 cm, 10 cm). Different lowercase letters indicate significant differences among treatments (P < 0.05).

温度低, 地上部生长较慢, 将更多的合成物质运输到地下部, 促进根系生长发育, 大粒种子地上部更强壮, 合成、运输到根系的物质更多^[26], 由于种子自身贮藏的物质较多, 因而根系发达。本试验中观察到大粒种根长、表面积、体积以及其干重均较小粒种高, 但这种差异随生育进程而逐渐缩小。有研究指出^[25], 在生产中选用能够发芽成苗的小粒种并配合田间管理, 小粒种苗也能达到与大粒种苗相似的生长状态, 但即便不同大、小粒种子间差异会逐渐减小, 大粒种后期仍表现一定优势, 植株更大, 根

系也更发达^[16], 这与本试验结果基本一致, 因此, 在生产上应尽可能选用中、大粒种做种, 为建立发达根系和健壮生长奠定基础。

本试验及前人研究均指出浅播有利于萌芽出苗和幼苗生长^[27], 而适当深播则有利于苗期和中后期根系生长, 主要原因可能是表层土通气性好, 白天温度高, 对种子萌芽出苗有利, 但表层土易失墒、干旱, 深层土土壤保墒性好、湿度大, 有利于根系的生长及其对水肥的吸收, 幼苗生长逐渐旺盛, 甚至超过浅播处理, 这与岳丽杰等^[10]研究结果基本一致。

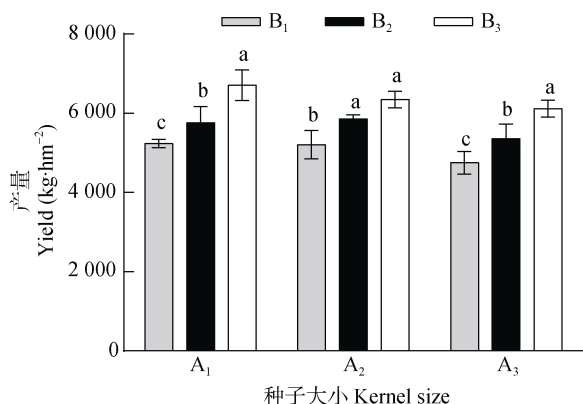


图 6 种子大小与播种深度对玉米产量的影响(2016 年大田试验)

Fig. 6 Effects of kernel size and sowing depth on yield of maize (field experiment in 2016)

A₁、A₂和 A₃ 分别代表大、中、小粒种子, B₁、B₂和 B₃ 分别代表 2 cm、6 cm、10 cm 播种深度。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。A₁、A₂和 A₃ respectively represent large grain, medium grain and small grain, B₁、B₂and B₃ respectively represent 3 sowing depth (2 cm, 6 cm, 10 cm). Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

表 5 玉米产量与吐丝期不同土层根系特性相关性(2016 年大田)

Table 5 Correlation between yield and root characteristics of different soil layers at silking stage of maize (field experiment in 2016)

性状 Character	相关系数 Correlation coefficient			
	0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm	0~40 cm
根长 Root length	0.41*	0.61**	0.27	0.52**
根表面积 Root surface area	0.37	0.73**	0.73**	0.51**
根体积 Root volume	0.56**	0.34	0.40*	0.60**
根干重 Root dry matters	0.44*	0.48*	0.67**	0.54**

*和**分别代表在 0.05 和 0.01 水平显著相关。* and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

前人研究指出,一定范围内根吸收能力、作物产量均与根系干物质质量呈正相关^[33],有较大根系的植株更容易形成高产^[34-35],在各土层内合理分布的发达根系能更有效吸收水肥资源^[36-37],为作物高产奠定物质基础。本研究表明,吐丝期根系主要形态指标及干重在各土层的分布量及总量与产量均呈现正相关关系,尤其是根干重。本试验中,根系主要集中于 10 cm 土层内,重量分布百分率占 70%以上,20 cm 以下土层分布率在 10%以内,根系分布深度远低于北方玉米^[38-39],这主要是由于川中丘陵地区耕层较浅所致,本文盆栽试验七叶期根系分布相对较深,20 cm 以下土层的重量分布率达 40%左右,远高于田间试验,这与试验盆横截面积小促使其纵向生长,以及盆栽土壤经整理后土块小、质地较疏松有利于根系下扎有关,由此也表明,玉米根系的分布受土壤条件的影响比较大。表层土壤中较高的根系分布虽能提高水分、养分吸收^[40],但当干旱来临,尤其是表层根系 ABA 分泌增加,降低了气孔导度,从而光

同时,玉米种子在萌发过程中能通过某种生理响应机制调节物质能量的分配,以减少一部分根的生长,从而确保胚芽鞘尽早出土。本试验中三叶期前 10 cm 播深下幼苗则可能是更多将积累的干物质分配给胚芽鞘以促进其生长,从而根系生长缓慢,后期幼苗以根系发育为主时,深播的优势逐渐明显^[28-29]。曹慧英等^[30]指出播深增加后根系生长速度也显著增加,同时生育后期总节根数和节根层数都增加,根多量大不仅有利于固定地上部,还有利于促进灌浆结实。但也有研究认为,播种过深则会导致胚乳无法提供足够养分供其生长,因而幼苗活力较低^[31],从而减小了幼苗长度^[30]、降低了幼苗干物质积累量^[32],这可能与试验条件和播种深度不同有关。本文两年试验均发生了不同程度的阶段性干旱,深播抗旱性强的优势得以发挥,因此,在干旱地区及季节中玉米应适当深播。

合速率降低,光合产物减少^[41],不利于高产。本试验深播条件下由于种子和初生根系发生位置较浅播处于更下层土壤,因而可以在一定程度上提高根系在 10 cm 以下土层中的总量及分布百分率。相关分析表明,玉米产量与 10 cm 以下土层的根干重和表面积相关系数更高,说明适当深播可以提高深层土壤中的根系分布数量,有利于玉米吸收深层土壤的水分和养分,并增强其抗旱性,从而有利于提高产量。由于川中丘区土层较浅薄,质地较黏重,不利于根系深扎,在精细整地基础上适当深播以促进根系向下生长显得尤为重要。

4 结论

大粒种子因贮藏营养物质较小粒种更多,幼苗生长更旺、根系更发达,虽然这种优势随生育进程推进有减弱趋势,但吐丝期其根系长、表面积、体积及干重仍高于小粒种。浅播有利于幼苗根系生长,三叶期 2 cm、6 cm 播深下根长、表面积、体积及干

重均大于 10 cm 播深, 但之后深播根系生长表现出一定优势, 至五叶期—七叶期后逐渐赶超浅播处理, 尤其是大、中粒种, 至吐丝期其根系长、表面积、体积及干重明显高于 2 cm 播深。深播条件下, 不仅中、后期根系更发达, 还有利于根系下扎, 提高 10 cm 以下土层根系分布率, 从而提高对深层土壤水肥的吸收能力及其抗旱性。中、大粒种最终产量高于小粒种, 中、深播产量则显著高于浅播, 大粒种子配合深播产量达最高。因此生产上应选大、中粒种并适当深播(6~10 cm)。

参考文献 References

- [1] 张旭丽, 李洪. 玉米根系与环境条件的关系[J]. 山西农业科学, 2010, 38(7): 120-122
ZHANG X L, LI H. Relationship between maize roots and the environmental conditions[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2010, 38(7): 120-122
- [2] 郭相平, 康绍忠, 索丽生. 苗期调亏处理对玉米根系生长影响的试验研究[J]. 灌溉排水, 2001, 20(1): 25-27
GUO X P, KANG S Z, SUO L S. Effects of regulated deficit irrigation on root growth in maize[J]. Irrigation and Drainage, 2001, 20(1): 25-27
- [3] 管建慧, 刘克礼, 郭新宇. 玉米根系构型的研究进展[J]. 玉米科学, 2006, 14(6): 162-166
GUAN J H, LIU K L, GUO X Y. Advances of research on maize root system architecture[J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(6): 162-166
- [4] 杨敏丽, 白人朴, 刘敏, 等. 建设现代农业与农业机械化发展研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 68-72
YANG M L, BAI R P, LIU M, et al. Development of agricultural mechanization and construction of modern agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 68-72
- [5] 齐飞, 朱明, 周新群, 等. 农业工程与中国农业现代化相互关系分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 1-10
QI F, ZHU M, ZHOU X Q, et al. Relationship analysis between agricultural engineering and agricultural modernization in China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 1-10
- [6] 卢庭启, 王秀全, 何丹, 等. 山地机播玉米一播全苗的限制因素及对策[J]. 耕作与栽培, 2013(4): 33-34
LU T Q, WANG X Q, HE D, et al. Limiting factors and countermeasures to ensure all seedlings of maize mechanical sowing in mountainous area[J]. Tillage and Cultivation, 2013(4): 33-34
- [7] 潘光堂, 杨克诚. 我国西南地区玉米育种面临的挑战及相应对策探讨[J]. 作物学报, 2012, 38(7): 1141-1147
PAN G T, YANG K C. Facing toward challenges and corresponding strategies for maize breeding in southwestern region of China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(7): 1141-1147
- [8] 朱钟麟, 赵燮京, 王昌桃, 等. 西南地区干旱规律与节水农业发展问题[J]. 生态环境, 2006, 15(4): 876-880
ZHU Z L, ZHAO X J, WANG C T, et al. The rules of drought and the development of water-saving agriculture in Southwest China[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(4): 876-880
- [9] 陈若礼, 王兴于, 张存岭, 等. 夏玉米播种出苗和生长发育与耕层土壤水分含量的关系[J]. 玉米科学, 2006, 14(S1): 112-113
CHEN R L, WANG X Y, ZHANG C L, et al. Relationship between seeding emergence and growth of summer maize and soil moisture content of cultivated layer[J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(S1): 112-113
- [10] 岳丽杰, 文涛, 杨勤, 等. 不同播种深度对玉米出苗的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(5): 88-93
YUE L J, WEN T, YANG Q, et al. Effects of different sowing depths on seeding emergence of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(5): 88-93
- [11] 张万松, 王春平, 张爱民, 等. 国内外农作物种子质量标准体系比较[J]. 中国农业科学, 2011, 44(5): 884-897
ZHANG W S, WANG C P, ZHANG A M, et al. A study on seed quality standard system of crops in domestic and abroad[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(5): 884-897
- [12] 王春平, 张万松, 陈翠云, 等. 中国种子生产程序的革新及种子质量标准新体系的构建[J]. 中国农业科学, 2005, 38(1): 163-170
WANG C P, ZHANG W S, CHEN C Y, et al. Innovation of the seed production procedures and establishment of corresponding seed quality criteria in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(1): 163-170
- [13] 武高林, 杜国祯. 植物种子大小与幼苗生长策略研究进展[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 191-197
WU G L, DU G Z. Relationships between seed size and seedling growth strategy of herbaceous plant: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(1): 191-197
- [14] KAUFMANN M L, GUITARD A A. The effect of seed size on early plant development in barley[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1967, 47(1): 73-78
- [15] 黄双全, 刘桂霞, 韩建国. 种子大小和播种深度对种苗建植的影响[J]. 草业科学, 2007, 24(6): 44-49
HUANG S Q, LIU G X, HAN J G. Effect of seed mass and sowing depth on seedling establishment[J]. Pratacultural Science, 2007, 24(6): 44-49
- [16] HAWKINS R C, COOPER P J M. Effects of seed size on growth and yield of maize in the Kenya highlands[J]. Experimental Agriculture, 1979, 15(1): 73-79
- [17] 石达金, 闫飞燕, 范继征, 等. 免耕条件下播种深度对玉米出苗性状及产量的影响[J]. 湖南农业科学: 上半月, 2014(3): 19-21
SHI D J, YAN F Y, FAN J Z, et al. Effects of different sowing depths on seedling characters and yield of maize under no-tillage conditions[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2014(3): 19-21
- [18] 王进, 张勇, 颜霞, 等. 光照、温度、土壤水分和播种深度对披针叶黄华种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 草业科学, 2011, 28(9): 1640-1644
WANG J, ZHANG Y, YAN X, et al. Influence of light, temperature, soil moisture and sowing depths on the seed germination and seedling growth of *Thermopsis lanceolata*[J]. Pra-

- tacultural Science, 2011, 28(9): 1640–1644
- [19] 谢明惠, 陈浩梁, 张光玲, 等. 温度、土壤湿度和播种深度对花生种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 花生学报, 2017, 46(2): 52–59
XIE M H, CHEN H L, ZHANG G L, et al. Effects of temperature, soil moisture and sowing depths on the seed germination and seedling growth of peanut[J]. Journal of Peanut Science, 2017, 46(2): 52–59
- [20] 王会肖. 土壤温度、水分胁迫和播种深度对玉米种子萌发出苗的影响[J]. 生态农业研究, 1995, 3(4): 70–74
WANG H X. Effects of soil temperature, water stress and sowing depth on germination and emergence of maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 1995, 3(4): 70–74
- [21] 李鲁华, 李世清, 翟军海, 等. 小麦根系与土壤水分胁迫关系的研究进展[J]. 西北植物学报, 2001, 21(1): 1–7
LI L H, LI S Q, ZHAI J H, et al. Review of the relationship between wheat roots and water stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2001, 21(1): 1–7
- [22] 周毅, 孙美玲, 程娟娟, 等. 籽粒大小、养分含量对苗期玉米的养分敏感性及其生长的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(1): 108–116
ZHOU Y, SUN M L, CHENG J J, et al. Effect of seed size and nutrient reserve on growth and susceptibility of maize hybrids to nutrient supply at seedling stage[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014, 29(1): 108–116
- [23] MÜNZZBERGOVÁ Z, PLAČKOVÁ I. Seed mass and population characteristics interact to determine performance of *Scorzonera hispanica* under common garden conditions[J]. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2010, 205(8): 552–559
- [24] VANGE V, HEUCH I, VANDVIK V. Do seed mass and family affect germination and juvenile performance in *Knautia arvensis*? A study using failure-time methods[J]. Acta Oecologica, 2004, 25(3): 169–178
- [25] 冯波, 刘延忠, 高荣歧, 等. 不同籽粒大小玉米种苗转化过程中生理特性研究[J]. 华北农学报, 2006, 21(4): 35–38
FENG B, LIU Y Z, GAO R Q, et al. Study on physical characteristic of different size seed during maize seed-seedling transformation[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2006, 21(4): 35–38
- [26] 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——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
E Y J, DAI J Y, GU W L. Studies on the relationship between root growth and yield in maize (*Zea mays*)——Relationships between the growth and absorption ability of the roots and the growth and development of the above-ground parts of maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 1988, 14(2): 149–154
- [27] 程秋博, 李孝东, 孔凡磊, 等. 干旱条件下籽粒大小与播种深度对夏玉米幼苗生长及产量的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(5): 167–173
CHENG Q B, LI X D, KONG F L, et al. Effect of grain size and sowing depth on seedling growth and yield of summer maize in drought condition[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(5): 167–173
- [28] 闫兴富, 仇智虎, 张婧, 等. 种皮和播种深度对辽东栋种子萌发和幼苗早期生长的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 53–60
YAN X F, QIU Z H, ZHANG Q, et al. Effects of coat and sowing depth on seed germination and early seedling growth of *Quercus wutaishanica*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(1): 53–60
- [29] 谢皓, 贾秀婷, 陈学珍, 等. 播种深度和种子大小对大豆出苗率和幼苗生长的影响[J]. 农学学报, 2012, 2(6): 10–14
XIE H, JIA X T, CHEN X Z, et al. Effects of sowing depth and seed size on seedling emergence percentage and seedling growth in soybean[J]. Journal of Agriculture, 2012, 2(6): 10–14
- [30] 曹慧英, 王丁波, 史建国, 等. 播种深度对夏玉米幼苗性状和根系特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2397–2404
CAO H Y, WANG D B, SHI J G, et al. Effects of sowing depth on seedling traits and root characteristics of summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2397–2404
- [31] OULED BELGACEM A, NEFFATI M, PAPANASTASIS V P, et al. Effects of seed age and seeding depth on growth of *Stipa lagascae* R. & Sch. seedlings[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 65(4): 682–687
- [32] REBETZKE G J, BRUCE S E, KIRKEGAARD J A. Longer coleoptiles improve emergence through crop residues to increase seedling number and biomass in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Plant and Soil, 2005, 272(1/2): 87–100
- [33] 王玉贞, 李维岳, 尹枝瑞. 玉米根系与产量关系的研究进展[J]. 吉林农业科学, 1999, 24(4): 6–8
WANG Y Z, LI W Y, YIN Z R. Advances in research on relationship between maize root system and yield[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 1999, 24(4): 6–8
- [34] 王群, 李潮海, 郝四平, 等. 下层土壤容重对玉米生育后期光合特性和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 787–793
WANG Q, LI C H, HAO S P, et al. Effects of subsoil bulk density on late growth stage photosynthetic characteristics and grain yield of maize (*Zea mays* L.)[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(4): 787–793
- [35] 戴俊英, 鄂玉江, 顾慰连. 玉米根系的生长规律及其与产量关系的研究——玉米根系与叶的相互作用及其与产量的关系[J]. 作物学报, 1988, 14(4): 310–314
DAI J Y, E Y J, GU W L. Studies on the relationship between root growth and yield in maize——The interaction of root system and leaves of maize and its relation with yield[J]. Acta Agronomica Sinica, 1988, 14(4): 310–314
- [36] 田霄鹤, 聂刚, 李生秀. 不同土壤层次供应水分和养分对玉米幼苗生长和吸收养分的影响[J]. 土壤通报, 2002, 33(4):

- 263–267
TIAN X H, NIE G, LI S X. Effect of water and nutrients supplying in different soil layers on growth and nutrition absorption of corn seedlings[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(4): 263–267
- [37] 田霄鸿, 胡志桥, 李生秀, 等. 碳酸氢根与水肥同层对玉米幼苗生长和吸收养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 757–763
TIAN X H, HU Z Q, LI S X, et al. Effects of bicarbonate with identical layer of water and fertilization at the same soil zone on growth and nutrient uptake of maize plants[J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 2005, 11(6): 757–763
- [38] 齐文增, 刘惠惠, 李耕, 等. 超高产夏玉米根系时空分布特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 69–76
QI W Z, LIU H H, LI G, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of super-high-yield summer maize root[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(1): 69–76
- [39] 戚廷香, 梁文科, 阎素红, 等. 玉米不同品种根系分布和干物质积累的动态变化研究[J]. 玉米科学, 2003, 11(3): 76–79
QI T X, LIANG W K, YAN S H, et al. Study on dynamic variation of root distribution and dry matter accumulation of different maize varieties[J]. Journal of Maize Sciences, 2003, 11(3): 76–79
- [40] KANG S Z, ZHANG L, LIANG Y L, et al. Simulation of winter wheat yield and water use efficiency in the Loess Plateau of China using WAVES[J]. Agricultural Systems, 2003, 78(3): 355–367
- [41] DU Y L, WANG Z Y, FAN J W, et al. β -aminobutyric acid increases abscisic acid accumulation and desiccation tolerance and decreases water use but fails to improve grain yield in two spring wheat cultivars under soil drying[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(13): 4849–4860