有机肥与种植密度对旱作玉米根系生长及功能的影响

刘镜波[1]，王小林[1]，张岁岐[1,2]，张仁和[3]，薛吉全[3]

(1. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室，陕西 杨凌 712100；
2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；3. 西北农林科技大学 农学院，陕西 杨凌 712100)

摘 要：在大田条件下研究了基施有机肥及 3 种种植密度(60，75，90 千株/hm^2)对旱作玉米根系生长和功能的影响。结果表明，在大喇叭口期，基施有机肥显著降低了 30—100 cm 土层内的根长与根表面积，但对根干重影响不显著；由于基施有机肥处理地上部生物量更大，因而显著降低了根冠比；种植密度对该时期根系生长的影响较小。在蜡熟期，基施有机肥限制了 30—100 cm 土层及 1/4 行间、行间与膜下位置的根系分布，但对根冠比的作用不显著。该时期根长、根表面积及根干重均有随密度增加而减少的趋势，该趋势在 0—30 cm 土层和株上位置表现显著；种植密度的增加也降低了根冠比。有机肥延缓根系衰老作用不明显，其根系导水率与不基施有机肥处理无显著差异；而在种植密度增加情况下，单位根系表面积吸水功能的提高弥补了根量减少带来的损失，表现出一定的适应性。

关键词：根系形态；根冠比；根系导水率；有机肥；玉米

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2011)06-0032-05 **中图分类号**：S513

Effect of Organic Fertilizer and Planting Density on Root Growth and Function of Maize in Dryland

LIU Jing-bo[1], WANG Xiao-lin[1], ZHANG Sui-qi[1,2], ZHANG Ren-he[3], XUE Ji-quan[3]

(1. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 3. *College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: This experiment was focused on the effect of organic fertilizer and planting density (60, 75 and 90 thousand plants/hm^2) on root growth and function of maize in field condition. The result showed that basal organic fertilizer reduced root length and surface area in 30—100 cm soil layer at pre-tasselling stage, but had no significant influence on root dry weight. The rate of root/shoot was significantly decreased because organic fertilizer dramatically increased the biomass of shoot. The influence of planting density on root growth was not significant. At waxen maturity stage, basal organic fertilizer restricted the distribution of root in 30—100 cm soil layer and at the position of 1/4 row space, 1/2 row space, under plastic mulch, but had no significant influence on root/shoot. The trends of root length, root surface area and root dry weight were decreased as planting density increasing, especially in 0—30 cm soil layer and at planting position. The increase of planting density also decreased the rate of root/shoot, but increased the root function. Organic fertilizer also didn't show the significant effect on deferring senescence and had no significant difference in hydraulic conductivity of root system compared with the treatments without basal organic fertilizer. Root showed some flexibility by increasing water uptake function per surface area as planting density increasing.

Keywords: root morphology; rate of root/shoot; hydraulic conductivity of root system; organic fertilizer; maize

根系具有固定植株、吸收无机养分和合成生理活性物质等作用[1]，也是植物吸收水分的主要器官，在土壤—植物—大气(SPAC)连续体中起着重要作用[2-3]。根系生长发育对作物的干旱适应性[4-6]及产

收稿日期：2011-03-29 **修回日期**：2011-05-03
资助项目：国家重点基础科学(973)研究发展计划项目"主要粮食作物高产栽培与资源高效利用的基础研究"(2009CB118604)；国家高技术研究(863)发展计划项目(2011AA1005A4)；国家自然科学基金项目(30971714)
作者简介：刘镜波(1985—)，男(汉族)，河南省开封市人，硕士研究生，研究方向为植物水分生理生态。E-mail：liujb665@126.com。
通信作者：张岁岐(1966—)，男(汉族)，陕西省岐山县人，研究员，博士生导师，主要从事植物水分生理生态研究。E-mail：sqzhang@ms.iswc.ac.cn。

量形成有密切关系[7-8],因而对它的研究日益受到重视,科研人员在根系发育规律[9-11],土壤内根系构型[12-14]与根系功能活性[15-16]等方面进行了大量研究。玉米是单株生产力较强的禾本科作物,其地上部生长有赖于强大根系的有力支撑,而在易受到水分胁迫的旱作条件下,根系对玉米生长及干旱适应也更为重要。

有机肥含有多种作物必需的营养元素,蕴含大量的生物活性物质,既可为植株提供养分,促进植株生长,又能提高与其配施的其它肥料利用率并改善土壤环境[17-18]。很多研究[19-20]均表明有机肥对根系有良好效应。选育耐密紧凑型品种增加种植密度是生产上增加玉米产量的重要措施[21]。关于密植对地上部的影响已有较多的研究[22-24],而对根系的研究则相对较少[25]。

相较于地上部,由于大田土壤环境的复杂性,对根系的研究仍显薄弱,对于有机肥与种植密度交互作用下根系变化的研究也较少。本试验即在大田环境中,研究了基施有机肥与 3 种种植密度对玉米根系生长及功能的影响,以期为旱作条件下玉米高产高效种植提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验地点概况

试验于 2009 年 4 月至 2010 年 9 月在中国科学院水利部水土保持研究所长武农业生态试验站分两年进行。试验站位于陕西省渭北旱塬西部,属西北黄土高塬丘陵沟壑区,地理位置位于 107°38′—107°58′E,34°59′—35°18′N;平均海拔 1 220 m。气候为暖温带半湿润大陆性气候,年均温 9.1 ℃,≥10 ℃积温 2 994 ℃,无霜期 171 d,地下水埋深 60 m。年均降水量 584.1 mm,且集中于 7—9 月份,期间降水量可占全年降水总量的 55%以上。

试验区农业生产主要依靠天然降雨,作物一年一熟,为典型的旱作农业区。试验土壤为中壤质黑垆土,土壤质地疏松。2010 年试验期间共降水 458.3 mm。

1.2　试验设计

试验选用品种为"先玉 335",采用玉米宽窄行种植(40 cm+80 cm),施用 P_2O_5 112.5 kg/hm^2,施用 N 肥 225.0 kg/hm^2(分为底肥与拔节期追肥),小区面积 6.0 m×4.8 m,设基施有机肥和种植密度 2 个因素共 6 个处理进行分析(表 1)。

1.3　测定项目及方法

1.3.1　根系生长特征测定　分别在大喇叭口期和蜡熟期用内径 9 cm 的根钻在每个处理的株上、株间、膜下、行间和 1/4 行间这 5 个位置取样,每处理重复 3 次。根钻垂直下钻至 100 cm,每隔 10 cm 深度取一个样品,然后采取冲洗和手工挑拣的方法,取出每个土层的根系。扫描仪扫描后,用图像分析软件 WinRhizo 处理得到每一钻所取根的根长和根表面积数据。之后将所得根样在 80 ℃下烘至恒重,用 1∶1 000天平称取干重,得到每一钻中根系生物量。

由每一钻的体积($\pi\times9^2\times10$ cm^3)计算单位土体中平均根干重,并折算单位面积根量(1 hm^2),即 667×15×1 m^3 的根量。

表 1　实验设计方案

处理编号	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
基施有机肥/(52 500 kg·hm^{-2})	基施	基施	基施	不施	不施	不施
密度/(千株·hm^{-2})	60(低密)	75(中密)	90(高密)	60(低密)	75(中密)	90(高密)

1.3.2　根冠比测定　在取根同时进行地上部取样,在烘箱中 105 ℃杀青 30 min,80 ℃烘制恒重,称干重,得到地上部单株生物量,由种植密度折算单位面积(1 hm^2)地上部生物量,并计算根冠比:

$$根冠比=\frac{单位面积根量}{单位面积地上部生物量}$$

1.3.3　根系导水率测定和数据处理　在蜡熟期使用高压液流仪(high pressure flow meter, HPFM)采用瞬时法测定植株根系导水率。

试验数据采用 Excel 软件进行整理及图表制作。

2　结果分析

2.1　根系剖面分布

将每个取样株 5 个位置得到的根系形态参数(根长、根表面积和根干重)平均后,再将 3 个重复平均,得到该处理根系平均特征(表 2)。

大喇叭口期 6 个处理平均根长密度 0.287 cm/cm^3,其中 T_5 最高为 0.318 cm/cm^3,T_2 最低为 0.206 cm/cm^3。无论 0—30 cm 耕层还是 30—100 cm 土层,不施用有机肥的处理具有较大的根长密度。而种植密度对 1 m 内平均根长密度无显著影响。

表 2 试验各处理的根系平均特征

根系形态参数	生育期	土层/cm	60 千株/hm²(低密)		75 千株/hm²(中密)		90 千株/hm²(高密)	
			基施有机肥(T_1)	不基施有机肥(T_4)	基施有机肥(T_2)	不基施有机肥(T_5)	基施有机肥(T_3)	不基施有机肥(T_6)
根长/(cm·cm^{-3})	大喇叭口期	0—30	0.488±0.038	0.555±0.155	0.540±0.127	0.809±0.167	0.491±0.053	0.701±0.051
		30—100	0.115±0.012	0.156±0.020	0.063±0.007	0.107±0.032	0.116±0.015	0.104±0.022
	蜡熟期	0—30	0.366±0.124	0.298±0.018	0.373±0.214	0.342±0.045	0.206±0.037	0.205±0.076
		30—100	0.031±0.010	0.061±0.021	0.030±0.006	0.060±0.011	0.025±0.003	0.044±0.012
根表面积/(cm²·cm^{-3})	大喇叭口期	0—30	0.092±0.006	0.099±0.015	0.111±0.028	0.123±0.034	0.079±0.012	0.103±0.008
		30—100	0.015±0.002	0.022±0.003	0.011±0.002	0.014±0.005	0.016±0.002	0.014±0.003
	蜡熟期	0—30	0.096±0.031	0.078±0.005	0.083±0.045	0.067±0.011	0.052±0.012	0.046±0.014
		30—100	0.005±0.002	0.011±0.003	0.005±0.001	0.008±0.001	0.004±0.000	0.007±0.002
根重/(mg·cm^{-3})	大喇叭口期	0—30	0.536±0.050	0.528±0.055	0.612±0.111	0.566±0.125	0.379±0.126	0.600±0.121
		30—100	0.055±0.015	0.069±0.010	0.041±0.004	0.054±0.015	0.063±0.006	0.053±0.019
	蜡熟期	0—30	0.833±0.303	0.601±0.105	0.565±0.168	0.538±0.060	0.443±0.125	0.376±0.113
		30—100	0.024±0.015	0.031±0.007	0.023±0.006	0.036±0.007	0.023±0.009	0.034±0.008

至蜡熟期时 6 个处理平均根长密度显著减小为 0.121 cm/cm³。基施有机肥的影响减弱,在耕层(0—30 cm)作用已不显著,但 30—100 cm 土层中根长密度仍显著低于不施用处理。种植密度的影响增强,中密 75 千株/hm² 处理拥有最大根长密度,显著高于高密 90 千株/hm² 处理,低密 60 千株/hm² 居中。进一步分析表明,种植密度更多地影响耕层根长密度,在 30—100 cm 土层并无显著差异。有机肥与种植密度对大喇叭口期 0—30 cm 耕层土壤中单位土体内根表面积均无显著作用,6 个处理间差异也较小。但在 30—100 cm 土层中,基施有机肥仍能显著降低该土层中根表面积。蜡熟期时根表面积显著减少,6 个处理单位土体内根表面积平均 0.026 cm²/cm³,约为大喇叭口期(0.041 cm²/cm³)的 61.7%,这一时期种植密度影响显著,在耕层和 30—100 cm 土壤低密 60 千株/hm² 均显著高于 90 千株/hm² 处理,中密处理(75 千株/hm²)居中。基施有机肥的影响则主要表现在 30—100 cm 土层,显著降低了该土层的根表面积。

种植密度与基施有机肥对大喇叭口期根干重影响均较弱,各处理间无显著差异。由大喇叭口期至蜡熟期,6 个处理单位土体内根干重的变化较小,但在 30—100 cm 土壤中仍表现为显著下降趋势。种植密度对蜡熟期耕层中根干重的影响较大,表现为:低密>中密>高密,其中低密与高密间有显著差异;密度对耕层以下 30—100 cm 土壤中根干重无显著影响。而基施机肥作用相反,主要在 30—100 cm 土层中表现,基施有机肥显著降低了该土层中根系生物量,与其对根长、根表面积的影响一致。

2.2 根系水平分布

大喇叭口期与蜡熟期根长水平分布如图 1 所示。研究表明,根长、根表面积及根干重水平分布规律相似,以株上位置为中心,离植株越远,其数值便愈小,即:zs(株上)>zj(株间)>mx(膜下)>qh(1/4 行间)>hj(行间)。株上位置的各根系形态参数均最大,且无论大喇叭口期还是蜡熟期都显著高于其它位置;株间其次,在大喇叭口期时显著高于 qh 与 hj 位置;膜下位置与 zj 类似,根长、根表面积密度在大喇叭口期显著高于 qh 与 hj 位置,但该位置的根干重与 qh 和 hj 差异不显著;至蜡熟期时 mx 位置根系有减少幅度较大,与 qh 和 hj 位置差异已不显著。

种植密度主要影响 zs 位置,蜡熟期时该位置根长、根表面积和根干重均表现为:低密>中密>高密。由于种植密度越大,作物株距就越小,在该位置的种内竞争也更激烈,导致根系减少。而基施有机肥的影响主要表现在离植株较远的 hj,qh 与 mx 位置,在蜡熟期,有机肥显著降低这 3 个位置的根长、根表面积和根干重。表明基施有机肥不仅制约 30—100 cm 土层中根系发育,也不利于其在水平方向上的均衡分布。

2.3 根冠比

试验表明基施有机肥会显著降低大喇叭口期根冠比,这主要是由于施用有机肥处理有更高的地上部生物量(T_1,T_2 和 T_3 处理地上部生物量平均为 7 517.7 kg/hm²,而不施用有机肥 3 个处理仅为 5 541.0 kg/hm²),其根系量差别并不显著。而在蜡熟期,基施有机肥的影响减弱,不造成根冠比的显著差异。种植密度的影响增强,根冠比随密度增加而降

低,密度 60 千株/hm^2 处理显著高于 90 千株/hm^2,75 千株/hm^2 居中。与大喇叭口期不同,造成此现象主要原因是根系生物量随种植密度增加表现为显著降低(图 2)。

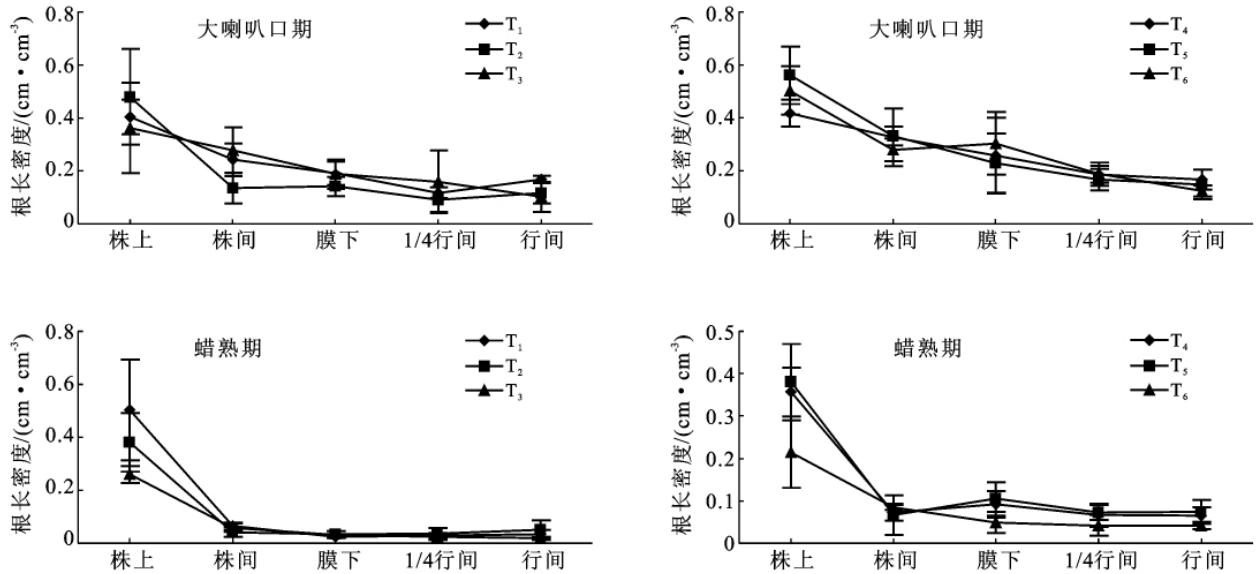


图 1　大喇叭口期和蜡熟期不同处理下根长水平分布

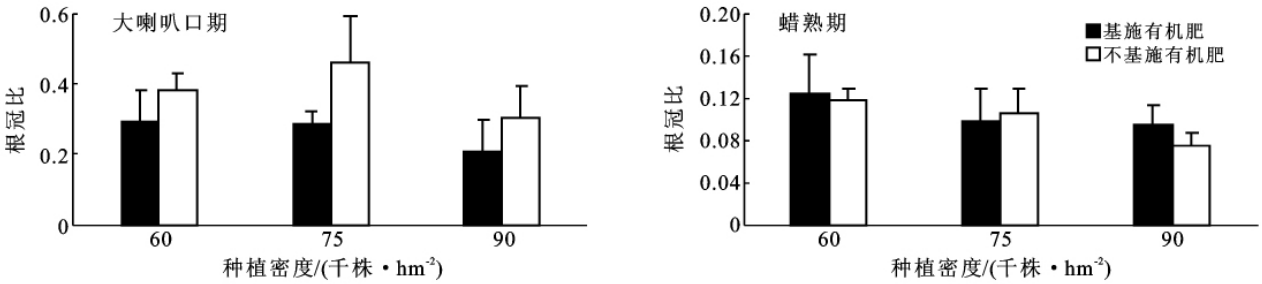


图 2　大喇叭口期和蜡熟期不同处理下玉米根冠比

2.4　根导水率

植物根系的导水率标志着根系运输传导水分的能力,直接影响根系吸收水分的多少[26],也是标志根系功能的一个重要指标。在蜡熟期运用 HPFM 对 6 个处理单株根系导水进行测定,其相对单位根系面积的导水率如图 3 所示。

从图 3 可知,基施有机肥处理根系导水率稍高,表明有机肥在维持根系活力,延缓衰老方面具有一定作用,但作用并不显著。根系导水率随种植密度升高而增加,低密、中密及高密处理根系导水率依次为 0.257,0.472 和 0.691 g/(s·MPa·m^2)。需要注意的是,该时期单株根系表面积规律是随种植密度增加而降低,即低密(5 227.3 cm^2)>中密(3 575.2 cm^2)>高密(2 021.0 cm^2);两方面综合作用的结果是 6 个处理间单株根系导水差异不显著。表明单株根系表面积降低时,作物可通过提高单位根系面积的吸收能力来适应逆境。

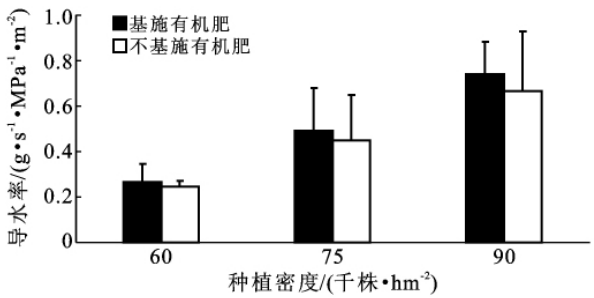


图 3　不同处理下蜡熟期根系导水率

3　结 论

一般认为有机肥对根系产生正效应,如对小麦的研究表明[19-20],有机肥可以促进根系的生长和根系在深层土壤中的分布;改善根系生理特性,增加根系吸收面积和活力,并提高不同土层、特别是深层土壤根系的活力;抑制根系的膜脂过氧化作用,使不同土层中的小麦根系 SOD 活性提高、MDA 含量降低,从而

延缓了根系的衰老，但这种效应在本试验中表现不明显。相反，基施有机肥降低了单位土体内玉米根长、根表面积和根干重，这在蜡熟期下部土壤和远离植株的 1/4 行间、行间与膜下位置表现尤为明显；也未表现出明显的延缓根系衰老的功能，蜡熟期根系导水率与不施用处理无显著差异。大喇叭口期基施有机肥处理由于较高的地上部生物量而降低了根冠比，表明基施有机肥在前期有促进生长作物，但这种促进作用主要表现在地上部，而未在根系上得到体现。在大喇叭口期，虽然总根量差异较小，但基施有机肥却限制了根系在垂直和水平方向上的分布，不施用有机肥处理发育出较大的下部根系量。由大喇叭口期至蜡熟期，各处理根系均有较大幅度的减少，但不基施有机肥处理仍维持了良好垂直剖面分布，在水平分布上也更均衡，有利于玉米在更大范围内土壤中的水分及养分利益，为后期生长发育提供良好条件。其结果是大喇叭口期后不施用有机肥处理地上部有更快地生长，蜡熟期时已和基施有机肥处理无显著差异。

此外，有机肥用量、有机肥与氮肥等无机肥料的配施[27]等因素制约了有机肥的作用，本试验便可能由于无机肥料少等原因而使有机肥无法很好地发挥作用。长期施用有机肥，具有增加土壤有机质和各种养分，提高土壤供肥能力和保水性能，改善土壤结构的作用[17]，而这些难以在短期试验得到体现，也是本试验中基施有机肥作用不明显的原因。

在大喇叭口期植株个体较小，拔节期追肥后营养也相对充足，故种内竞争较弱，种植密度对根系的影响也较小。其后随植株增大，种内竞争加剧，种植密度的作用也增强。在蜡熟期高密处理(90 千株/hm^2)单位土体内的根长、根表面积和根干重均低于中密(75 千株/hm^2)和低密(60 千株/hm^2)处理，主要表现在 0—30 cm 耕层土壤和株上位置。高密处理显著低于低密，而低密和中密之间差异较小。虽然根系表面积随种植密度增加而降低，但根系功能却相反，高密处理下单位根系表面积的导水率显著大于低密处理，综合的结果表现为各处理单株根系导水差异不显著。表明试验中的栽培模式适宜于 60～75 千株/hm^2 的密度，而不能较好地支持高密 90 千株/hm^2 的种植密度。

[参 考 文 献]

[1] 山东省农业科学院玉米研究所. 玉米生理[M]. 北京：农业出版社，1987：20-39.

[2] Sumio Itoh. Insitu measurement of rooting density by micro rhizotron[J]. Soil Sci. Plant Nutr., 1985, 31(4): 653-656.

[3] 冯福学，黄高宝，柴强，等. 不同耕作措施对冬小麦根系时空分布和产量的影响[J]. 生态学报，2009，25(9)：2499-2506.

[4] Kirham M B, Grecu S J, Kanemasu E T. Comparison of minirhizotrons and the soil-water-depletion method to determine maize and soybean root length and depth[J]. European Journal of Agronomy, 1998, 8(1/2): 117-125.

[5] Chaves M M, Maroco J P, Pereira J S. Understanding plant responses to droughts from genes to the whole plant [J]. Functional Plant Biology, 2003, 30(2): 239-264.

[6] Fordel, Lorenzo. The nutritional control of root developmen[J]. Plant and Soil, 2001, 232(1): 51-68.

[7] 刘培利，林琪，隋方功，等. 紧凑型玉米根系高产特性的研究[J]. 玉米科学，1994，2(1)：59-63.

[8] 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.

[9] 管建慧，郭新宇，王纪华，等. 玉米不同部位根系生长发育规律的研究[J]. 玉米科学，2007，15(6)：82-85，88.

[10] 杨青华，高尔明. 砂姜黑土玉米根系生长发育动态的研究[J]. 作物学报，2000，26(5)：587-293.

[11] Fageria N K, Moreira A. The role of mineral nutrition on root growth of crop plants[J]. Advances in Agronomy, 2011, 110: 251-331.

[12] Spollen W G, Tao W J, Valliyodan B, et al. Spatial distribution of transcript changes in the maize primary root elongation zone at low water potential[J]. BMC Plant Biology, 2008, 8(1): 32-46.

[13] 李少昆，张旺峰，魏邦军，等. 不同密度玉米根系在大田土壤中的分布、重量的调节及与地上部分的关系[J]. 玉米科学，1993，1(3)：43-49.

[14] 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.

[15] Redjalaa T, Zelkoa I, Sterckeman T, et al. Relationship between root structure and root cadmium uptake in maize[J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 71(2): 241-248.

[16] 牛文全，郭超. 根际土壤通透性对玉米水分和养分吸收的影响[J]. 应用生态学报，2010，21(11)：2785-2791.

[17] 刘玉涛. 旱地玉米施用有机肥的定位研究[J]. 玉米科学，2003，11(2)：86-882.

[18] 刘海，黄建国，袁玲，等. 肥料配施对冬小麦产量和氮肥利用效率的影响[J]. 贵州农业科学，2009，37(10)：48-50.

[19] 张永清，苗果园. 水分胁迫条件下有机肥对小麦根苗生长的影响[J]. 作物学报，2006，32(6)：811-816.

[20] 李絮花，杨守祥，于振文，等. 有机肥对小麦根系生长及根系衰老进程的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2005，11(4)：467-472.

(下转第 41 页)

栏都有防沙效果,但高度为 50～90 cm 的栅栏其防沙效果较好,60～70 cm 的防护效果最佳,但两者积沙方向有所不同,60 cm 高度阻沙栅栏下风向风沙堆积较多,70 cm 高阻沙栅栏上风向风沙堆积较多。在推广应用中,应充分考虑防护对象性质,选用恰当高度的阻沙栅栏,阻沙栅栏过低,防沙效果较差,阻沙栅栏过高,成本较高且易被大风吹到。阻沙栅栏建成初期,防沙效果略弱,随之防沙效果逐渐增强,在栅栏前方形成防沙堤,延长了栅栏的防沙时限,提高了防沙能力。依据阻沙栅栏前后地表断面形态、蚀积量以及蚀积强度的变化,本研究将栅栏前后分为风沙堆积区、风蚀区和蚀积平衡区,其中,－7～3 H 为风沙堆积区,3～20 H 为风蚀区,20～30 H 为蚀积平衡区,且 3 区域范围与栅栏高度有关。

[参 考 文 献]

[1] Skidmore E L. Soil erosion by wind[M]// El-Baz F, Hassan M H A. Physics of Desertification. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1986:261-273.

[2] 张克存,屈建军,董治宝,等. 风沙流中风速脉动对输沙量的影响[J]. 中国沙漠,2006,26(3):336-340.

[3] 刘连友. 区域蚀积量和蚀积强度初步研究:以晋陕蒙接壤区为例[J]. 地理学报,1999,54(1):59-68.

[4] Wiggs G F S,. Baird A J, Atherton R J. The dynamic effects of moisture on the entrainment and transport of sand by wind[J]. Geomorphology, 2004,59:13-30.

[5] Fryrear D W. Wind erosion: Field measurement and analysis[J]. Transactions of the ASAE, 1991,34(1): 155-160.

[6] 朱朝云. 土壤风蚀的野外试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 1987(1):125-131.

[7] 张伟民,汪万福,张克存,等. 不同沙源供给条件下砾石床面的风沙流结构与蚀积量变化风洞试验研究[J]. 中国沙漠,2009,29(6):1015-1020.

[8] 张伟民,汪万福,李志刚. 敦煌莫高窟顶几种典型床面蚀积量变化过程的初步观测[J]. 中国沙漠,2008, 28(6): 1039-1044.

[9] 汪万福,王涛,樊锦诗,等. 敦煌莫高窟顶尼龙网栅栏防护效应研究[J]. 中国沙漠,2005,25(5):640-648.

[10] 罗万银,董治宝,钱广强,等. 直立阻沙栅栏流场特征的风洞模拟试验[J]. 中国沙漠,2009,29(2):200-205.

[11] 张正偲,董治宝,赵爱国,等. 沙漠地区风沙活动特征[J]. 干旱区研究,2007,24(4):550-555.

[12] 张克存. 风沙活动特征及其工程防沙主要措施研究[D]. 甘肃 兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,2006.

[13] 张克存,屈建军,俎瑞平,等. 腾格里沙漠东南缘输沙势与最大可能输沙量之比较[J]. 干旱区地理,2008,31(5): 643-648.

[14] Fryberger S G. Dune form and wind regime[C]// McKee E D. A Study of Global Sand Eas. US Geological Survey Pro-fessional Paper, 1979:137-169.

[15] Lettau K, Lettau H. Experimental and micrometeorologicalfield studies of dune migration[C]// Lettau K, Lettau H. Exporing the World's Driest Climate. University of Wiscon-sin-Madison, IES Report, 1977:110-147.

[16] 李红军,何清,杨青. 近 40 a 新疆输沙势的分析[J]. 中国沙漠,2004,24(6):706-710.

(上接第 36 页)

[21] Donald N D. The contribution of breeding to yield advances in maize[J]. Advances in Agronomy,2005, 86: 83-145.

[22] 段巍巍,李慧玲,肖凯,等. 密度对玉米光合生理特性和产量的影响[J]. 玉米科学,2007,15(2): 98-101.

[23] 李宁,翟志席,李建民,等. 密度对不同株型的玉米农艺、根系性状及产量的影响[J]. 玉米科学,2008,16(5):98-102.

[24] Lemcoff J H, Loomis R S. Nitrogen and density influences on silk emergence, endosperm development, and grain yield in maize (*Zea mays* L.)[J]. Field Crops Research, 1994,38(2):63-72.

[25] 管建慧,郭新宇,刘洋,等. 不同密度处理下玉米根系干重空间分布动态的研究[J]. 玉米科学,2007,15(4): 105-108, 118.

[26] 沈玉芳,王保莉,曲东,等. 水分胁迫下磷营养对玉米苗期根系导水率的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2002,30(5):11-14.

[27] 董旭,娄翼来. 长期定位施肥对土壤养分和玉米产量的影响[J]. 现代农业科学,2008,15(1):9-11.