

网络出版时间:2018-12-04 10:11

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2019.06.005

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20181204.1010.010.html

深松结合不同施肥方式对春玉米根系时空分布特征的影响

梁 尧,蔡红光,袁静超,刘剑钊,闫孝贡,张洪喜,任 军

(吉林省农业科学院 农业资源与环境研究所/农业部 东北植物营养与农业环境重点实验室,吉林 长春 130033)

【摘 要】【目的】阐明深松结合不同施肥方式对东北春玉米根系时空分布特征的影响。【方法】2011—2012 年,采用 2 年田间定位试验,设置常规模式(农民习惯栽培模式,对照,T1)、深松模式(T2)、深松+氮肥深追模式(T3)、深松+氮肥深追+增施有机肥模式(综合培肥模式,T4)4 个处理,在玉米主要生育期采集 0~10,10~20,20~30,30~40,40~60 cm 土层根系样品,利用 WinRhizo 根系分析系统获取根长、根表面积与根系平均直径,同时测定各生育期玉米根系干质量及成熟期籽粒产量与地上干物质量。【结果】2011—2012 年,随着生育进程的推进,玉米的根系干质量、根长、根表面积均呈先增加后降低的单峰曲线变化,并在吐丝期达到最大值;根系平均直径总体呈现缓慢增加或保持平稳的变化趋势。不同处理对各生育期玉米的根系干质量、根表面积和根长有着不同程度的影响,以吐丝后期各指标的变幅较为明显,但各指标年际间的差异并不显著。与常规处理相比,深松处理对根系干质量、根长及根表面积的影响并不显著;深松+氮肥深追处理对根系生长的促进作用主要集中于吐丝期之后,而综合培肥处理从 6 展叶期起对根系生长就有显著的促进作用,总根系干质量、总根长及总根表面积显著增加,根系平均直径大幅度降低。在各生育期,根系干质量、根长、根表面积和根系平均直径随着土层深度的增加呈现逐渐降低并趋于平缓的变化趋势,其中深层(30~40 和 40~60 cm)土壤中的根系生长对深松+氮肥深追与综合培肥处理的响应较为敏感,特别是综合培肥处理各指标的变化更为显著,在成熟期,与常规处理相比,综合培肥处理 30~40 和 40~60 cm 土层根系干质量的增幅分别为 91%和 72%,根长的增幅分别为 68%和 130%,根表面积的增幅分别为 128%和 87%。2011—2012 年,与常规处理相比,深松处理对玉米籽粒产量和地上干物质量的影响不显著,深松+氮肥深追处理和综合培肥处理玉米籽粒产量及地上干物质量显著增加,增幅分别为 8.92%,16.1%和 9.21%,17.7%。【结论】深松配合氮肥深追有利于根系干质量的增加,促进了根系纵深分布,并获得了较高的玉米产量。在此基础上增施有机肥对玉米根系生长的促进作用更为显著,更有利于根系干物质的积累与“纵向延伸”根系构型的形成,从而保证了其更高的玉米产量。

【关键词】春玉米;根系分布;施肥方式

【中图分类号】S513.062

【文献标志码】A

【文章编号】1671-9387(2019)06-0031-10

Effect of subsoiling combined with different soil amendment practices on temporal and spatial distribution of spring maize roots

LIANG Yao,CAI Hongguang,YUAN Jingchao,LIU Jianzhao,

YAN Xiaogong,ZHANG Hongxi,REN Jun

(Institute of Agricultural Resource and Environment,Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-Environment in

Northeast Region Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China,

Jilin Academy of Agricultural Sciences,Changchun,Jilin 130033,China)

Abstract: 【Objective】The objective of this study was to understand the temporal and spatial distribu-

【收稿日期】2018-05-04

【基金项目】国家重点研发计划项目(2017YFD0300601);国家现代农业产业技术体系项目(CARS-07-G-6);吉林省人才开发资金项目;吉林省农业科技创新工程项目(CXGC2017ZD001);吉林省农业科学院创新工程项目(人才基金)

【作者简介】梁 尧(1984—),女,吉林辽源人,助理研究员,博士,主要从事土壤培肥原理研究。E-mail:liangyaosmart@163.com

【通信作者】任 军(1960—),男,吉林公主岭人,研究员,博士,主要从事土壤培肥研究。E-mail:renjun557@163.com

tion characteristics of spring maize roots affected by subsoiling combined with different soil amendment treatments, which would provide support for evaluating integrated soil management practices. 【Method】 A two-year field experiment (2011 and 2012) was conducted with four treatments, including common practice (the cultivation pattern used by farmers, CK, T1), subsoiling (T2), subsoiling with nitrogen fertilizer supplemented in deep soil (T3), and integrated practices (subsoiling plus nitrogen fertilizer supplemented in deep soil and organic manure amendment, T4). Roots samples distributed in 0—10, 10—20, 20—30, 30—40 and 40—60 cm soil profiles were collected at the main growth stages. The root analysis system WinRhizo was used to determine root length, area and diameter, and root dry weight at main growth stages, and grain yields, aboveground biomass of maize at harvest stage were also investigated. 【Result】 In 2011 and 2012, root dry weight, root length and root area at main growth stages firstly increased and then decreased with the highest values at tasseling stage. The average root diameter showed slow increase or no change. Root dry weight, root length and root area at main growth stages were affected by different soil amendment treatments. The changes were significant at tasseling stage, but inter-annual variations were not significant. Compared with T1, root dry weight, length and area of T2 were not significantly changed, T3 treatment increased root dry weight, length and area while decreased average root diameter after tasseling stage, and T4 treatments significantly increased these parameters since the six-leaf stage. The root dry weight, root length, root area and average root diameter at main growth stages gradually decreased and then flattened with increase of soil depth. Roots distributed at soil layers of 30—40 cm and 40—60 cm responded sensitively to T3 and T4 treatments. At mature stage, compared with T1, root dry weight at two soil layers of 30—40 cm and 40—60 cm in the T4 treatment increased by 91% and 72%, root length increased by 68% and 130%, and root area increased by 128% and 87%, respectively. In 2011 and 2012, compared with T1, grain yield was not significantly changed in T2, but increased by 8.92%, 16.1% and 9.21%, 17.7% in T3 and T4, respectively. 【Conclusion】 Combination of subsoiling and nitrogen fertilizer supplemented in deep soil improved root development and promoted root distribution, resulting in high grain yield of spring maize. Better performance of root weight, root distribution and grain yield were obtained by adding organic manure application in the soil amendment practice.

Key words: spring maize; root distribution; soil amendment

东北地区是我国玉米生产的主产区与重要的玉米商品粮基地,在保障国家粮食安全方面发挥着重要的作用。东北春玉米的高产与稳产得益于该区域分布着土质肥沃、有机质含量较高的黑土。然而,近些年来,长期不合理的耕种与施肥制度所导致的耕层结构劣化、养分供应失衡、有机质含量下降等土壤肥力退化现象日益凸显,严重制约了玉米产量潜力的发挥^[1-2]。针对这些问题,生产中普遍推广深松耕作、追肥深施以及增施有机肥等形式的土壤管理措施,以期达到提升土壤肥力与提高玉米生产效率的目的^[3-4],因此综合评价不同土壤综合管理模式对土壤-玉米系统生产力的作用效果对于科学指导农业生产具有重要意义。

根系是玉米生长的基础,是连接土壤与地上部分物质交换的桥梁,一方面根系的发育程度决定了玉米产量的高低与水肥利用效率^[5-6],发达的根系总

是伴随着地上部的旺盛生长并获得较高的生产效率;另一方面,根系的生长及其形态会对土壤的结构、水分、养分等异质性因子做出适应性的响应,结构良好、水肥充足的土壤环境利于玉米根系的延伸与生长,相反,当土壤机械阻力过大,水分、养分匮乏时,玉米根系的形态与功能将进行补偿性适应^[7-8]。耕作、施肥等土壤培育管理措施改变了土壤的水肥供应状况,深刻地影响着根系的生长、分布及功能,从而使玉米的产量形成过程发生变化^[9-10]。因此,研究根系的生长分布特征将有助于综合评价土壤培育管理措施的优劣。

前人围绕深松、氮肥深施、施用有机肥等单一土壤管理方式对根系生长分布特征的影响已开展了一定的研究^[11-13],但有关在农业生产中普遍采用的综合管理模式,玉米根系的时空分布规律尚缺乏报道。因此,本研究以吉林省中部玉米主产区的 2 年

田间试验为基础,探讨玉米连作体系下,深松结合不同土壤施肥方式对春玉米根系干物质积累与形态时空分布特征的影响,以期为综合评价土壤肥力管理方式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于吉林省公主岭市的吉林省农业科学院试验田($43^{\circ}52'58''\text{N}$, $124^{\circ}82'49''\text{E}$),土壤类型为黑土,母质为第四纪形成的黄土状母质。该地区气候属于温带大陆性季风气候,冬季寒冷,夏季高温多雨,雨热同季,年降雨量为 600 mm,年均气温为 5.6°C ,无霜期 125~140 d,有效积温 $2\ 600\sim 3\ 000^{\circ}\text{C}$,总日照时数 1 220 h 左右。田间试验起始于 2010 年,试验前该区域 0~20 cm 耕层土壤的基本理化性质为:有机质 16.2 g/kg,碱解氮 180.4 mg/kg,速效磷 20.8 mg/kg,速效钾 148.9 mg/kg, pH 值 5.5。作物种植模式为玉米连作。

1.2 试验设计

试验共设 4 个处理,分别为(1)T1:常规模式,农民习惯栽培模式,化肥采用撒施方式,其他田间管理同一般大田;(2)T2:深松模式,在常规栽培模式基础上,于 6 月中下旬中耕时采用深松铲进行深松,深度为 15 cm;(3)T3:深松+氮肥深追模式,在 T2 模式基础上,随深松铲在垄侧约 15 cm 深处进行氮素追施;(4)T4:深松+氮肥深追+增施有机肥模式,即综合培肥模式,在 T3 模式基础上,于每年秋收后撒施有机肥(牛粪),待播前整地时与耕层土壤混合,年均施用量为 $8\ \text{t}/\text{hm}^2$,牛粪中碳、氮、磷、钾的年均投入量分别为 2 624, 162, 42.4 和 77.6 kg/ hm^2 。每个处理重复 3 次,随机区组排列。小区面积为 $7\ \text{m}\times 10\ \text{m}=70\ \text{m}^2$ 。各处理每年化肥施用量为 $\text{N}\ 195\ \text{kg}/\text{hm}^2$, $\text{P}_2\text{O}_5\ 75\ \text{kg}/\text{hm}^2$, $\text{K}_2\text{O}\ 82.5\ \text{kg}/\text{hm}^2$,供试化肥分别为尿素、磷酸二铵和氯化钾,磷肥和钾肥作为基肥一次性施入,氮肥的 30% 作为底肥,70% 于拔节期追施。供试玉米品种均为郑单 958,种植密度 7 万株/ hm^2 。2011 年全年降雨量和玉米生育期降雨量分别为 499.8 和 320.6 mm,2012 年全年降雨量和玉米生育期降雨量分别为 882.5 和 595.5 mm。

1.3 样品采集与测定方法

2011 年分别于 6 展叶期(V6)、12 展叶期(V12)、吐丝期(VT)、乳熟期(R3)和成熟期(R6)5 个时期进行 T1、T2 和 T3 处理根系样品采集,2012

年在 6 展叶期(V6)、吐丝期(VT)和成熟期(R6)3 个时期进行各处理根系样品采集。因考虑 T4 处理有机肥施用效果具有一定的滞后性^[14],故仅在 2012 年挖取其根系样品。根系样品采集方法为,每个小区以植株为中心挖掘 $1/2$ 行距(30 cm) $\times 1/2$ 株距(10 cm)范围内深度为 60 cm 的土体(由于 6 展叶期玉米根系主要分布于 0~40 cm 土层,故在 V6 时期根系样品采集深度为 40 cm 土体内根系 2 株,在 0~40 cm 土层每 10 cm 为一层,40~60 cm 为一层。每层土体中的所有可见根系经人工挑出,将根系上附着的土和杂质去除,用清水冲洗干净。用扫描仪(Epson V700)扫描后获得根系图片,利用 WinRhizoPro 5.0 软件分析(Pro2004b, Canada)获得根长、根表面积、根系平均直径等指标,将根系烘干后采用称重法测定根系干质量。在玉米成熟期每小区选取有代表性的植株 5 株测定籽粒产量与地上干物质质量。

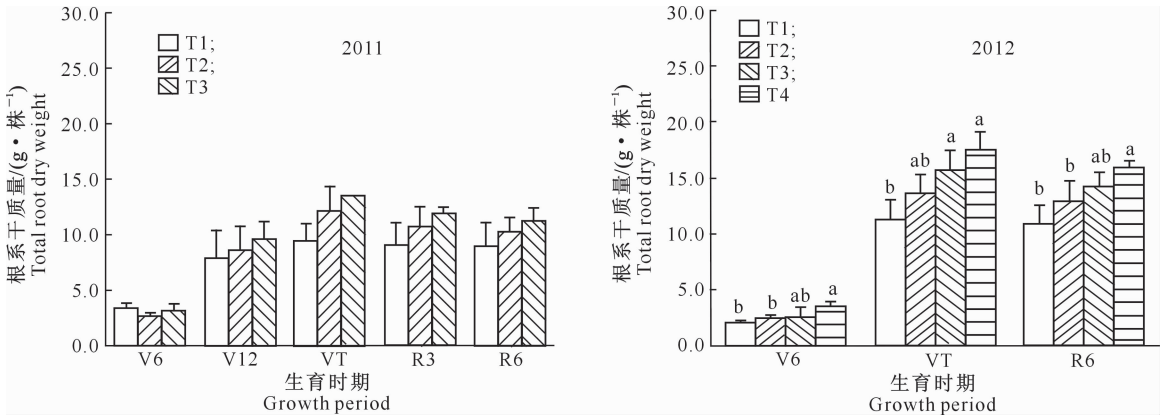
1.4 数据统计与分析

采用 Excel 和 Origin 8.5 进行试验数据整理分析与绘图,利用 SPSS 17.0 软件进行方差分析(ANOVA),用最小显著差数法(LSD)进行多重比较。方差分析表明年份与处理之间的交互作用不显著,故仅按年份对各处理的相关指标进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 深松结合不同施肥方式对玉米根系生物量时空分布的影响

深松结合不同施肥方式下玉米根系干质量的生育期动态变化如图 1 所示。图 1 显示,随着生育进程的推进,玉米的根系干质量呈先增加后降低的单峰曲线变化,在吐丝期达到最大值。2012 年同一处理下根系干质量明显高于 2011 年,以吐丝期为例,2011 年 T1、T2 和 T3 处理下根系干质量为 9.5~13.6 g/株,2012 年 T1、T2、T3 和 T4 处理根系干质量为 11.3~15.8 g/株。不同处理方式对各生育期玉米的根系特征有着显著影响。2011 年,与 T1 处理相比,T2 和 T3 处理明显增加了各生育期玉米的根系干质量,但差异未达到显著水平($P>0.05$)。2012 年,与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理增加了各生育期玉米的根系干质量;其中 T3 处理显著增加了吐丝期的根系干质量,增幅为 41%;T4 处理显著增加了 6 展叶期、吐丝期与成熟期的根系干质量,增幅分别为 68%, 55% 和 46%。



T1. 常规模式;T2. 深松模式;T3. 深松+氮肥深追模式;T4. 深松+氮肥深追+增施有机肥模式;V6. 6 展叶期;V12. 12 展叶期; VT. 吐丝期;R3. 乳熟期;R6. 成熟期。图柱上标不同字母表示不同处理间差异达显著水平($P<0.05$)。下同
T1. Common practice;T2. Subsoiling;T3. Subsoiling plus nitrogen fertilizer supplemented in deep soil;T4. Integrated practices,i. e. subsoiling plus nitrogen fertilizer supplemented in deep soil and organic manure amendment;
V6. 6-leaf stage;V12. 12-leaf stage;VT. Tasseling stage;R3. Milk stage;R6. Maturity. Different letters above the bars mean significant difference at the $P<0.05$ level among treatments. The same below

图 1 深松结合不同施肥方式下玉米根系干质量的时间动态变化

Fig. 1 Temporal changes of total maize root dry weight affected by subsoiling combined with different soil amendment practices

在各生育期,根系干质量随着土层深度的增加呈现逐渐降低并趋于平缓的变化趋势(图 2)。在 6 展叶期,0~10,10~20,20~30,30~40 cm 土层根系干质量的平均值为 1.6,0.6,0.3 和 0.2 g/株,0~20 cm 土层根系干质量占总根系干质量的 80%~84%;在吐丝期,0~10,10~20,20~30,30~40,40~60 cm 土层根系干质量的平均值为 11.6,1.9,0.9,0.6 和 0.8 g/株,0~20 cm 土层根系干质量占总根系干质量的 79%~88%;在成熟期,0~10,

10~20,20~30,30~40,40~60 cm 土层根系干质量的平均值为 7.6,2.7,1.4,1.0 和 0.9 g/株,0~20 cm 土层根系干质量占总根系干质量的 76%~78%。可见 0~20 cm 土层是根系干质量分布的主体,吐丝期前主要以轴根的物质积累为主,深层根干质量的积累较为缓慢;与吐丝期前相比,吐丝期后侧根的生长与物质积累加快,深层根系干质量的积累比例较高。

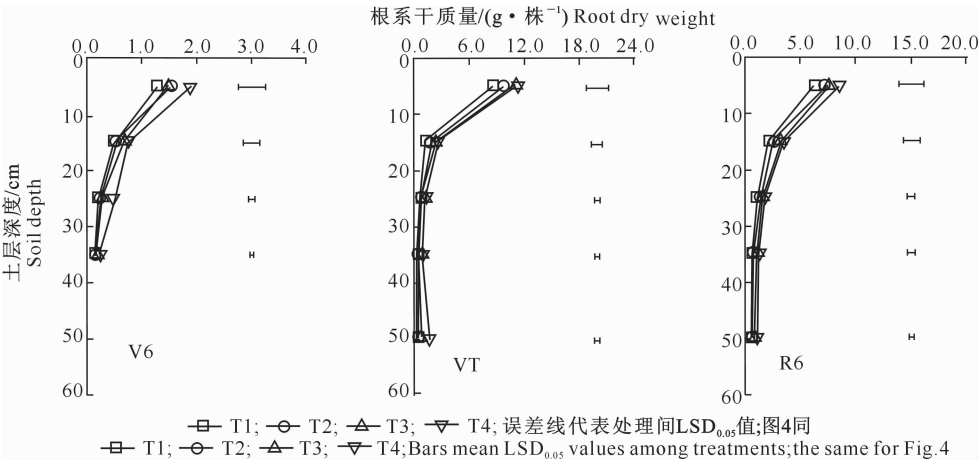


图 2 深松结合不同施肥方式下玉米根系干质量的空间分布变化(2012 年)

Fig. 2 Spatial change of maize root dry weight affected by subsoiling combined with different soil amendment practices (2012)

图 2 显示,深松结合不同施肥方式对各生育期玉米根系干质量的空间分布有着显著影响。在 3 个生育期,不同培肥处理 0~10,10~20,20~30,30~

40,40~60 cm 土层根系干质量由高到低均表现为 $T4>T3>T2\geq T1$ 。在 6 展叶期,与 T1 处理相比,T2 与 T3 处理对各土层根系干质量的影响未达到

差异显著水平;T4 处理显著增加了 0~10,10~20, 20~30,30~40 cm 土层根系干质量,增幅分别为 45%,55%,144%和 66%。在吐丝期,与 T1 处理相比,T2 处理对 0~10,10~20,20~30,30~40,40~60 cm 土层根系干质量的影响未达到差异显著水平;T3 和 T4 处理对 0~10 cm 土层根系干质量的影响差异不显著,但显著增加了 10~60 cm 各土层的根系干质量,T3 和 T4 处理 10~20,20~30,30~40,40~60 cm 土层根系干质量的增幅分别为 103%,62%,84%,94%和 151%,86%,101%,398%,且在 30~40 和 40~60 cm 土层中,T3 与 T4 处理根系干质量之间差异达显著水平。在成熟期,

与 T1 处理相比,T2 和 T3 处理对 0~10,10~20, 20~30,30~40,40~60 cm 土层根系干质量影响均未达到差异显著水平,T4 处理对 0~30 cm 土层根系干质量的影响差异不显著,但显著增加了 30~40 和 40~60 cm 土层的根系干质量,2 个土层根系干质量的增幅分别为 91%和 72%。可见,与 T1 处理相比,T3 和 T4 处理有利于根系的纵向延伸,且对 30~60 cm 土层根系干质量积累的促进作用较为突出。

2.2 深松结合不同施肥方式对玉米根系形态时空分布的影响

2011 和 2012 年,深松结合不同施肥方式下玉米各生育期根系形态的动态变化如图 3 所示。

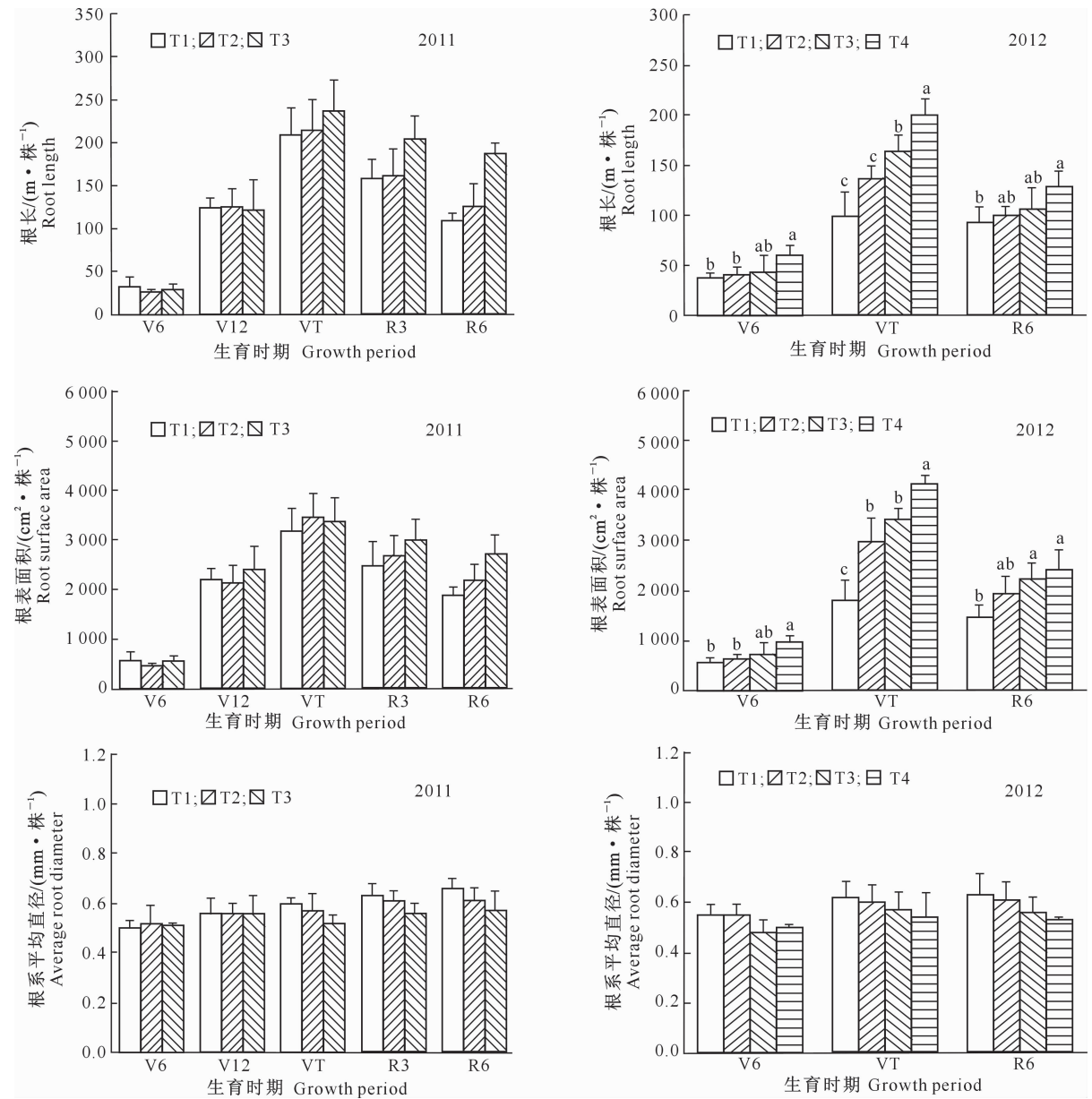


图3 深松结合不同施肥方式下玉米根系形态特征的时间动态变化

Fig. 3 Temporal change of maize root morphological characteristics affected by subsoiling combined with different soil amendment practices

图 3 显示,随着生育进程的推进,玉米的根长和根表面积均呈先增加后降低的单峰曲线变化,均在吐丝期达到最大值;根系平均直径总体呈现缓慢增加或保持平稳的变化趋势。从各根系指标年际间的变化来看,在吐丝期前,同一处理根长与根表面积均表现为 2012 年高于 2011 年,吐丝期后则表现为前者低于后者;根系平均直径在年际间的变化并不明显。2011 年,与 T1 处理相比,T2 和 T3 处理明显增加了吐丝期后根长和根表面积,降低了根系平均直径。2012 年,与 T1 处理相比,T4 处理显著增加了

玉米各生育期的根长与根表面积;T3 处理显著增加了玉米吐丝期的根长和根表面积,T2 处理对各生育期根系形态指标的影响总体无显著差异。从不同时期根系各形态指标的变幅来看,以吐丝期最为突出,2012 年,与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理根长的增幅分别为 38%,60%和 101%,根表面积的增幅分别为 64%,89%和 129%。

深松结合不同施肥方式下玉米根系形态特征的空间变化见图 4。

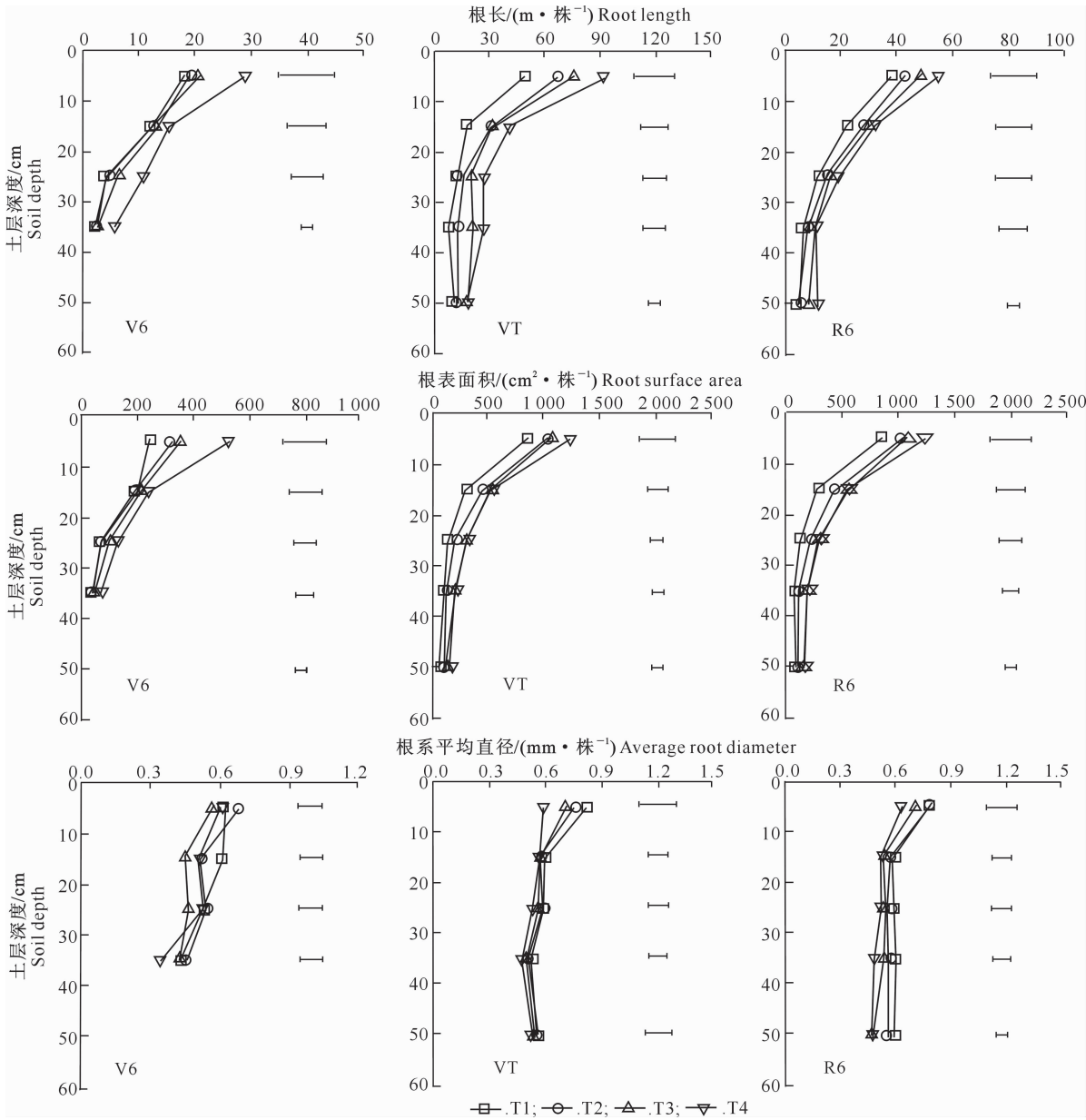


图 4 深松结合不同施肥方式下玉米根系形态特征的空间分布变化(2012 年)

Fig. 4 Spatial change of maize root morphological characteristics affected by subsoiling combined with different soil amendment practices (2012)

图 4 显示,玉米根长、根表面积和根系平均直径均随着土层的加深而逐渐降低。深松结合不同施肥

方式对各生育期玉米根系的垂直分布有着显著影响。在 6 展叶期,不同培肥处理 0~10,10~20,20~30,30~40 cm 土层根长与根表面积由高到低均表现为 T4>T3>T2≥T1,不同处理各土层根系平均直径的变化无明显规律。与 T1 处理相比,T4 处理显著增加了 0~10,10~20,20~30,30~40 cm 土层根长和根表面积,增幅分别为 56%,19%,187%,146%和 107%,24%,67%,80%;T2 和 T3 处理对 0~40 cm 土层根系各形态指标的影响均未达到差异显著水平。

图 4 显示,在吐丝期,深松结合不同施肥方式下 0~10,10~20,20~30,30~40,40~60 cm 土层根长和根表面积均以 T4 处理最高,T3 和 T2 处理其次,T1 处理最低。与 T1 处理相比,T3 和 T4 处理显著增加了 0~10,10~20,20~30,30~40,40~60 cm 土层根长和根表面积,且二者间的差异也达到显著水平;其中 T3 处理 0~10,10~20,20~30,30~40,40~60 cm 土层根长的增幅分别为 53%,82%,63%,62%和 60%,根表面积的增幅分别为 76%,176%,46%,80%和 77%;T4 处理 0~10,10~20,20~30,30~40,40~60 cm 土层根长的增幅为 86%,129%,113%,172%和 57%,根表面积的增幅为 87%,195%,147%,192%和 181%。不同处理各土层根系平均直径与根长的变化相反,以 T1 处理最高,T2 其次,T3 和 T4 处理最低,但各处理间差异不显著。

图 4 显示,在成熟期,深松结合不同施肥方式下

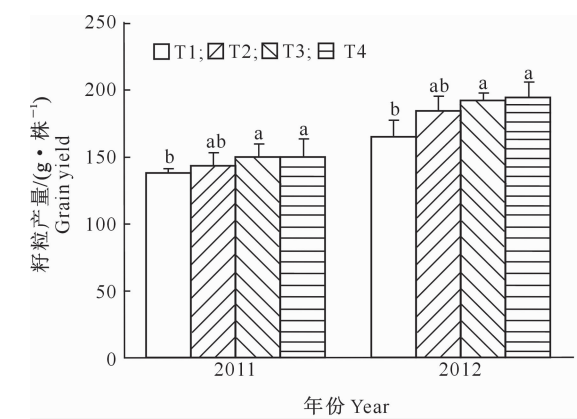


图 5 深松结合不同施肥方式下玉米籽粒产量与地上干物质量的时间变化

Fig. 5 Change of maize grain yield and shoot dry biomass affected by subsoiling combined with different soil amendment practices

3 讨 论

在营养生长阶段,玉米根系的发育与叶片同步发生,在进入生殖生长阶段后根系生长缓慢甚至停

止生长^[15]。本研究中,玉米根系干质量、根长和根表面积随着生育期的推进表现为先增加后降低的变化趋势,在吐丝期达到最高;根系平均直径随着生育期的推进呈现缓慢增加或保持平稳的趋势。虽然 0~10,10~20,20~30,30~40,40~60 cm 土层根长和根表面积由高到低同样表现为 T4>T3>T2>T1,根系平均直径的变化与之相反。与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理对 0~10 cm 土层根长和根表面积的影响差异均不显著,但 T3 和 T4 处理显著增加了 30~40,40~60 cm 土层的根长和根表面积,T3 处理 30~40,40~60 cm 土层根长和根表面积的增幅分别为 59%和 64%,104%和 85%;T4 处理 30~40,40~60 cm 土层根长和根表面积的增幅分别为 68%和 130%,128%和 87%。

2.3 深松结合不同施肥方式对玉米籽粒产量与地上干物质量的影响

深松结合不同施肥方式下玉米籽粒产量与地上干物质量的变化如图 5 所示。图 5 显示,2011 和 2012 年各处理玉米籽粒产量与地上干物质量的变化趋势较为一致,均以 T4 和 T3 处理较高,T2 处理次之,T1 处理最低。与 T1 处理相比,T3 与 T4 处理籽粒产量显著增加,T3 处理 2011 和 2012 年籽粒产量的增幅分别为 8.92%和 16.1%,T4 处理 2011 和 2012 年籽粒产量的增幅分别为 9.21%和 17.7%,T2 处理与其他处理籽粒产量差异均不显著。2011 年,各处理地上干物质量间的差异均不显著;2012 年,与 T1 处理相比,T3 和 T4 处理显著增加了玉米的地上干物质量,增幅分别为 11.2%和 12.7%,T2 处理略有增加,但与 T1 处理差异不显著。

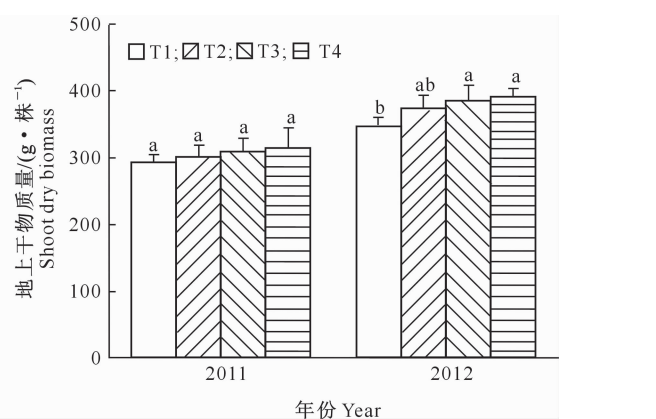


图 5 深松结合不同施肥方式下玉米籽粒产量与地上干物质量的时间变化

Fig. 5 Change of maize grain yield and shoot dry biomass affected by subsoiling combined with different soil amendment practices

止生长^[15]。本研究中,玉米根系干质量、根长和根表面积随着生育期的推进表现为先增加后降低的变化趋势,在吐丝期达到最高;根系平均直径随着生育期的推进呈现缓慢增加或保持平稳的趋势。虽然

2012 年全年降雨量和生育期总降雨量均高于 2011 年,但根系各性状指标年际间的差异并未达到显著水平。

作物根系的作用和功能很大程度取决于其生物量与空间分布^[16]。有研究指出,深耕(35 cm)可打破犁底层,改善土壤物理结构,从而减小根系穿透阻力,利于根系下扎,形成“纵向延伸”的根系构型,提高土壤中下层根系的生物量,增加玉米的总根长和总根表面积^[17],同时,深耕对根系的影响主要表现在吐丝期后,且随着生育期的推移差异会逐渐增加^[11]。与之不同,也有研究指出,中耕深松(25 cm)处理在干旱年份促进了玉米根系的生长,但在降雨量正常年份对根系的影响不显著^[18]。本研究中,深松处理增加了各生育期的玉米根系干质量、根长和根表面积,但与常规模式的差异均未达到显著水平,其原因可能与降雨等自然因素有关。

氮肥施用位置对玉米根系的数量、长度和表面积有着显著影响。研究表明,将氮肥施入耕层(0~20 cm),具有促进根系下扎的作用^[19]。本研究中,与常规处理相比,深松配合氮肥深追(15 cm)处理增加了玉米 6 展叶期、吐丝期及成熟期的根系干质量、根长和根表面积,降低了根系平均直径,且在吐丝期后根系干质量、根长和根面积的增加更为突出,特别是增加了 30~40, 40~60 cm 土层的根长和根表面积,这对于玉米吸收深层土壤中的水分与养分、提高玉米抗逆性、延缓生育后期根系衰老具有重要的作用^[16,20],这可能与该处理下深层土壤无机氮与含水量较高有关^[21];在吐丝期,与常规处理相应土层相比,深松配合氮肥深追处理 10~20 cm 土层根长和根表面积的增加幅度明显高于其他土层,原因在于氮素深施对根系生长有局部的短期刺激作用,使根系长度增加,扩大了植物觅取水分和养分的土壤空间,增强了根系的生理功能^[22]。

有机肥具有改善土壤结构和供应养分的双重作用。研究表明,有机肥与无机肥配施可改善土壤的物理、化学和生物学性质,促进作物根系的生长发育,而良好的根系又可以促进养分向地上部的运输,从而促进地上部和地下部的协同生长^[23-24]。在施氮量相同的条件下,增施有机肥可显著增加各生育期小麦根系的生物量^[13]。本研究中,与深松+氮肥深追处理相比,深松+氮肥深追+增施有机肥处理对各生育期玉米根系干质量、根长和根面积的增加效果更为突出,而这种效果于 6 展叶期已明显体现出来,且显著增加了各时期深层(30~40 与 40~60

cm)土壤根系的分布,可见深松+氮肥深追+增施有机肥处理能有效改善土壤结构特征,提升土壤的水分和养分供应能力^[12],从而更有利于玉米根系的干物质积累与“纵向延伸”根系构型的建成。细根是植物吸收水分和养分的重要器官^[25]。本研究中,与常规处理相比,深松、深松+氮肥深追以及深松+氮肥深追配合增施有机肥 3 个处理使各土层根系平均直径及总量均有所降低,表明根系中细根的比例有所增加,但其变化未达到显著水平,从某种程度表明,根系平均直径这一指标对土壤培肥管理模式的影响具有一定的滞后性。

作物产量与根系发育程度密切相关,健壮而发达的根系往往伴随着丰富的地上部物质积累量和籽粒产量^[26]。本研究中,2011 和 2012 年,深松处理对玉米籽粒产量和地上干物质质量的影响与常规处理相比差异均不显著,而深松配合氮肥深追及在此基础上增施有机肥处理玉米籽粒产量和地上干物质质量均显著增加,且以深松+氮肥深追+增施有机肥处理的增幅最高,这与深松对黑钙土玉米产量影响的研究结果^[27]相似。结合团队前期关于不同培肥模式对土壤肥力、作物养分利用效率影响的研究结果^[14,20],建议在东北黑土肥力提升过程中,特别是短期内实现土壤-作物综合生产力的提升目标时,应考虑土壤结构优化、氮肥合理运筹及外源有机物质补给等多项技术的综合应用。

4 结 论

与常规模式和深松模式相比,深松结合不同施肥措施对各生育期玉米根系干质量、根表面积和根长有不同程度的影响,其中,以吐丝期各指标的变幅最为明显。深松配合氮肥施用利于根系干质量的增加,促进了根系纵深分布,并获得了较高的玉米籽粒产量,在此基础上增施有机肥对玉米根系生长的促进作用更为显著,更利于深层根系的建成,对于玉米籽粒产量的形成与地上干物质的积累具有重要的意义。

[参考文献]

- [1] 赵兰坡,王鸿斌,刘会青,等. 松辽平原玉米带黑土肥力退化机理研究 [J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 78-84.
Zhao L P, Wang H B, Liu H Q, et al. Mechanism of fertility degradation of black soil corn belt of Songliao plain [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(1): 78-84.
- [2] 魏 丹,匡恩俊,迟凤琴,等. 东北黑土资源现状与保护策略 [J]. 黑龙江农业科学, 2016(1): 158-161.

- Wei D, Kuang E J, Chi F Q, et al. Status and protection strategy of black soil resources in Northeast of China [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016(1):158-161.
- [3] Cai H G, Ma W, Zhang X Z, et al. Effect of subsoil tillage depth on nutrient accumulation, root distribution, and grain yield in spring maize [J]. The Crop Journal, 2014, 5(2):297-307.
- [4] 查燕, 武雪萍, 张会民, 等. 长期有机无机配施黑土土壤有机碳对农田基础地力提升的影响 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(23):4649-4659.
- Zha Y, Wu X P, Zhang H M, et al. Effects of long-term organic and inorganic fertilization on enhancing soil organic carbon and basic soil productivity in black soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(23):4649-4659.
- [5] Gahoonia T S, Nielsen N E. Root traits as tools for creating phosphorus efficient crop varieties [J]. Plant and Soils, 2004, 260(1/2):47.
- [6] 牛晓丽, 胡田田, 张富仓, 等. 局部恢复供水对苗期玉米生长、根系吸收能力及解剖结构的影响 [J]. 中国农业科学, 2017, 50(16):3110-3121.
- Niu X L, Hu T T, Zhang F C, et al. Effect of partial water re-supply at seedling stage on maize growth, water absorption capacity and anatomical structure [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(16):3110-3121.
- [7] Ji B, Zhao Y, Mu X, et al. Effects of tillage on soil physical properties and root growth of maize in loam and clay in central China [J]. Plant Soil and Environment, 2013, 59:295-302.
- [8] Lipiec J, Siczek A, Sochan A, et al. Effect of sand grain shape on root and shoot growth of wheat seedlings [J]. Geoderma, 2016, 265:1-5.
- [9] 漆栋良, 吴雪, 胡田田. 施氮方式对玉米根系生长、产量和氮素利用的影响 [J]. 中国农业科学, 2014, 47(14):2804-2813.
- Qi D L, Wu X, Hu T T. Effects of nitrogen supply methods on root growth, yield and nitrogen use of maize [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(14):2804-2813.
- [10] Hassan F U, Ahmad M, Ahmad N, et al. Effects of subsoil compaction on yield and yield attributes of wheat in the sub-humid region of Pakistan [J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96:361-366.
- [11] 张瑞富, 杨恒山, 高聚林, 等. 深松对春玉米根系形态特征和生理特性的影响 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(5):78-84.
- Zhang R F, Yang H S, Gao J L, et al. Effect of subsoiling on root morphological and physiological characteristics of spring maize [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(5):78-84.
- [12] 马存金, 刘鹏, 赵炳强, 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]. 植物营养与肥科学报, 2014, 20(4):845-859.
- Ma C J, Liu P, Zhao B Q, et al. Regulation of nitrogen application rate on temporal and spatial distribution of roots and nitrogen uptake in different N use efficiency maize cultivars [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4):845-859.
- [13] 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]. 植物营养与肥科学报, 2005, 11(4):467-472.
- Li X H, Yang S X, Yu Z W, et al. Effects of organic manure application on growth and senescence of root in winter wheat [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2005, 11(4):467-472.
- [14] 张秀芝, 蔡红光, 闫孝贡, 等. 不同培肥方式下春玉米氮磷钾养分累积与分配特征 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(5):309-313.
- Zhang X Z, Cai H G, Yan X G, et al. Characteristics of accumulation and distribution of N, P and K of spring maize under different fertilizer methods [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(5):309-313.
- [15] 李春俭, 彭云峰, 牛君仿, 等. 土壤中的玉米根系生长及其研究应注意的问题 [J]. 植物营养与肥科学报, 2010, 16(1):225-231.
- Li C J, Peng Y F, Niu J F, et al. Real maize roots in the soil and issues should be considered by study [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2010, 16(1):225-231.
- [16] 齐文增, 刘惠惠, 李耕, 等. 超高产夏玉米根系时空分布特征 [J]. 植物营养与肥科学报, 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]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2012, 18(1):69-76.
- [17] 李晓龙, 高聚林, 胡树平, 等. 不同深耕方式对土壤三相比及玉米根系构型的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4):1-7.
- Li X L, Gao J L, Hu S P, et al. Effect of various cultivation approaches on the three-phase ratio of soil and root system structure of maize [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(4):1-7.
- [18] 肖继兵, 孙占祥, 杨久廷, 等. 半干旱区中耕深松对土壤水分和作物产量的影响 [J]. 土壤通报, 2011, 43(6):709-714.
- Xiao J B, Sun Z X, Yang J T, et al. Effect of subsoiling on soil water and crop yield in semi-arid area [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 43(6):709-714.
- [19] 苗果园, 高志强, 张云亭, 等. 水肥对小麦根系整体影响及其与地上部相关的研究 [J]. 作物学报, 2002, 28(4):445-450.
- Miao G Y, Gao Z Q, Zhang Y T, et al. Effect of water and fertilizer to root system and its correlation with tops in wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(4):445-450.
- [20] Wen Z, Shen J, Blackwell M, et al. Combined applications of nitrogen and phosphorus fertilizers with manure increase maize yield and nutrient uptake via stimulating root growth in a long-term experiment [J]. Pedosphere, 2016, 26:62-73.
- [21] 蔡红光, 袁静超, 闫孝贡, 等. 不同培肥措施对土壤物理性状及无机氮的影响 [J]. 土壤通报, 2017, 48(2):445-453.
- Cai H G, Yuan J C, Yan X G, et al. Characteristics of soil physical property and mineral nitrogen under different soil fertility managements [J]. Chinese Journal of Soil Science,

2017,48(2):445-453.

[22] 米国华,陈范骏,春 亮,等. 玉米氮高效品种的生物学特征 [J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(1):155-159.
Mi G H,Chen F J,Chun L,et al. Biological characteristics of nitrogen efficient maize genotypes [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer,2007,13(1):155-159.

[23] 宋 日,吴春胜,马艳丽,等. 有机无机肥料配合施用对玉米根系的影响 [J]. 作物学报,2002,28(3):393-396.
Song R,Wu C S,Ma Y L,et al. Effect of application of combined fertilizers on the root system of maize [J]. Acta Agonomica Sinica,2002,28(3):393-396.

[24] 张国娟,濮晓珍,张鹏鹏,等. 干旱区棉花秸秆还田和施肥对土壤氮素有效性及根系生物量的影响 [J]. 中国农业科学,2017,50(13):2624-2634.
Zhang G J,Pu X Z,Zhang P P,et al. Effects of stubble returning to soil and fertilization on soil nitrogen availability and root biomass of cotton in arid region [J]. Scientia Agricultura Sinica,2017,50(13):2624-2634.

[25] Eapen D,Barroso M L,Ponce G,et al. Hydrotropism: root growth responses to water [J]. Trends Plant Science,2005,10(1):44-50.

[26] 苏志峰,杨文平,杜天庆,等. 施肥深度对生土地玉米根系及根际土壤肥力垂直分布的影响 [J]. 中国生态农业学报,2016,24(3):142-153.
Su Z F,Yang W P,Du T Q,et al. Effect of fertilization depth on maize root and rhizosphere soil fertility vertical distribution in immature loess subsoil [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2016,24(3):142-153.

[27] 王秋菊,高中超,常本超,等. 有机物料深耕还田改善石灰性黑钙土物理性状 [J]. 农业工程学报,2015,31(10):161-166.
Wang Q J,Gao Z C,Chang B C,et al. Deep tillage with organic materials returning to field improving soil physical characters of calcic chernozem [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(10):161-166.

(上接第 30 页)

[32] Karamage F,Zhang C,Kayiranga A,et al. Usle-based assessment of soil erosion by water in the Nyabarongo River Catchment,Rwanda [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2016,13(8):835.

[33] 傅水龙,梁娟珠,黄路平. 基于 RUSLE 模型的长汀县水土流失评估 [J]. 水土保持通报,2016,36(1):196-200.
Fu S L,Liang J Z,Huang L P. Assessment of soil and water loss in Changting County based on RUSLE model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2016,36(1):196-200.

[34] 陈思旭,杨小唤,肖林林,等. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究 [J]. 资源科学,2014,36(6):1288-1297.
Chen S X,Yang X H,Xiao L L,et al. Study of soil erosion in the southern hillside area of China based on RUSLE model [J]. Resources Science,2014,36(6):1288-1297.

[35] 胡文敏,周卫军,余宇航,等. 基于 RS 和 USLE 的红壤丘陵区小流域水土流失量估算 [J]. 国土资源遥感,2013,25(3):171-177.
Hu W M,Zhou W J,Yu Y H,et al. Estimation of soil erosion in red earth hilly area based on RS and USLE [J]. Remote Sensing for Land and Resources,2013,25(3):171-177.