

不同深耕方式对土壤三相比及玉米根系构型的影响

李晓龙, 高聚林, 胡树平, 于晓芳, 王志刚, 苏治军, 谢 岷
(内蒙古农业大学农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘 要: 以先玉 335 为材料, 采用条深旋(TS)35 cm、深松(SS)35 cm、深翻(SF)35 cm 三种深耕方式, 以浅旋耕作 15 cm 为对照, 通过测定土壤三相比和玉米根系结构, 进行比较研究, 以探明不同深耕方式对土壤三相比及玉米根系构型的影响。结果表明: 深耕通过提高土壤的气相比和液相比降低固相比, 使得耕层土壤结构指数(*GSSI*)升高, 土壤三相结构距离(*STPSD*)降低, 使耕层土壤物理结构更加逼近理想状态; SF 能够显著改善耕层 20~60 cm 土层的土壤物理结构, SS 对 40~60 cm 土层土壤结构的改良效果较为明显, SS 和 SF 的土壤改良作用效果好于 TS; 深耕条件下玉米的总根长和总根表面积均高于浅旋耕处理, 土壤中下层根系的生物量明显增加, 并且 0~0.5 mm 径级的细根生物量所占比例较大; 在玉米根系根长的分布中 0~0.2 mm 径级的根系所占比例最大, 在根表面积的分布中以 0.1~0.3 mm 径级的根系为主; 土壤气相比与玉米根系的细根长和细根表面积呈极显著正相关关系, 而液相比和固相比则与其呈显著负相关关系; 深耕能够改良土壤物理结构, 使土壤密度降低, 含水量升高, 同时增加了玉米根系的根于重、根长和根表面积, 根系中细根所占比例增大。土壤三相比与玉米根系的细根长和细根表面积具有一定的相关性, 在一定范围内较高的气相比会促进玉米细根的生长, 较高的固相比和液相比会抑制细根的生长, 土壤三相比共同影响玉米根系的生长。

关键词: 深耕方式; 土壤三相比; 玉米; 根系构型
中图分类号: S513.01 **文献标志码:** A

Effects of various cultivation approaches on the three-phase ratio of soil and root system structure of maize

LI Xiao-long, GAO Ju-lin, HU Shu-ping, YU Xiao-fang, WANG Zhi-gang, SU Zhi-jun, XIE Min
(College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: To evaluate effects of different deep cultivation approaches on the three-phase ratio of soil and root system structure of maize, the maize cultivar Xianyu 335 was used under three cultivation methods including deep-spin (TS) 35 cm, subsoiling (SS) 35 cm, and deep plowing (SF) 35 cm by comparing to shallow rotary tillage (CK) 15 cm, to examine the three-phase ratio of soil and maize root system structure. It turned out that by increasing the gaseous phase ratio and liquid phase ratio and decreasing the solid phase ratio, deep plowing increased the *GSSI* and decreased the *STPSD*, allowing the physical structure of soil in plow layer to reach an ideal state. SF could significantly improve the physical structure of soil in plow layer as deep as 20~60 cm, while SS could obviously improve the soil structure in soil layer as deep as 40~60 cm. The soil-improving effects of SS and SF were better than those of TS. Additionally, total length and surface area of roots in deep plowing were higher than those in the shallowly rotary tillage. There was obvious increment of biomass in the middle and lower root systems in soil and the biomass from fine roots with diameters between 0~0.5 mm was dominant. For distributions of corn roots with various lengths, root system with the diameter of 0~0.2 mm accounted for the most, while for distributions of roots with different surface areas, roots with the diameters between 0~

收稿日期: 2014-06-10
基金项目: 国家玉米产业技术体系(CARS-02-63); 国家粮食丰产科技工程(2011BAD16B13, 2012BAD04B04, 2013BAD07B04, 2011BAD16B14); 内蒙古高等学校青年科技英才支持计划(NJYT-14-B04)
作者简介: 李晓龙(1989—), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要从事玉米生理生态的研究。E-mail: hhhhtlxiaolong@163.com。
通信作者: 高聚林(1964—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 教授, 主要从事作物生理生态研究。E-mail: nmgaojulin@163.com。

0.33 mm are the majority. The gaseous phase of soil was significantly and positively correlated with the length and surface area of fine roots of corn root system, while liquid phase and solid phase showed significant and negative correlations with the length and surface area of fine roots of corn root system. Deep plowing could improve the physical structure of soil, decrease the density of soil, increase the water content, and simultaneously increase the weight of root trunk, length and surface area of roots. The proportion fine roots within the root system of corn accounting for became increased. Three phases of soil had certain correlations with the length and surface area of fine roots of corn root system. To some extent, high gaseous phase ratio would promote the growth of fine corn roots, while high solid ratio and liquid phase liquid would inhibit their growth. The three phases of soil co-influenced the growth of corn root system.

Keywords: Varius cultivation; three-phase ratio of soil; maize; root system structure

土默川平原灌区由于常年采用浅旋耕作方式,造成土壤耕层变浅,蓄水保肥能力差,容重大,犁底层厚且坚硬,作物根系吸收土壤水分、养分的范围变小,土壤生产能力下降^[1],成为该地区春玉米产量进一步提高的限制因素。深耕可以打破犁底层直接改变土壤的物理性状,土壤性状的改变直接影响玉米根系的生长、分布和功能。根系是玉米生长的基础,在玉米生物产量形成和生物产量转化为经济产量的过程中起到重要作用^[2]。前人的研究表明,不同直径范围内的根长功能不同,直径在 0.5 mm 以上的较粗根对养分吸收作用不大^[3]。因此,0.5 mm 径级以下的细根被认为是根系吸收的活性位点^[4],细根长对水分、养分的吸收起着重要的作用^[5]。李潮海等研究表明,土壤紧实度的增加使根生长量和长度大幅度降低,造成根系变短变粗^[6],同时土壤深层的容重也对玉米根系生长具有较大影响^[7],玉米根系不能穿过容重为 $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的土层。而 Mil-likin^[8]提出土壤容重对细根垂直分布的影响,主要与土壤中空气含量有关,细根集中在土壤表层主要由于土壤容重小,较易获得充足的氧气。并且细根的深度分布也受土壤水分因素的影响^[9-10],土壤含水量在某一范围内时,根系生长表现出随着土壤水分的增加而逐渐增加的现象,但土壤中水分不足或过量时会抑制根系的生长^[11]。通过前人的研究可知,土壤的固、液、气状况与作物的根系结构及分布密切相关,而深耕无疑会改变土壤的固、液、气三相的比例分配,但关于条深旋、深松、深翻三种深耕方式对土壤三相比及对不同径级根系的作用效果的相关报道较少。本研究通过条深旋(TS)35 cm、深松(SS)35 cm、深翻(SF)35 cm 打破土壤犁底层,对比分析土壤三相比及玉米根系构型对三种深耕方式的响应。明晰三种深耕方式对土壤物理性状及玉米根系生长的作用效果,为内蒙古平原灌区采用适宜的深耕措施提高玉米产量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2013 年在内蒙古农业大学科技示范园区萨拉齐试验基地(土默川平原灌区典型地块)进行。前茬为玉米,土质为沙壤土,0~30 cm 土壤含有机质 $14.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $36.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $5.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $78.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值为 7.6。土壤耕层深度 20 cm,犁底层较厚且坚硬(17~35 cm),犁底层紧实度为 1 755 kPa。试验设春季深翻 35 cm(SF)、春季深松 35 cm(SS)、春季条深旋 35 cm(TS)和常规旋耕 15 cm(CK)四个处理。试验采用大区对比法试验,每大区面积为 $4.5 \text{ m} \times 120 \text{ m}$ 。参试玉米品种为先玉 335,播种密度 $5\,500 \text{ 株} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$,行距 50 cm。施肥量为种肥磷酸二铵 $15.2 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ 、硫酸钾 $6 \text{ kg} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$,追肥尿素 $37.5 \text{ kg} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$,于小喇叭口期(8~10 叶展)一次追施。全生育期共灌水 4 次,每次灌水 $50 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$,其它管理同大田生产。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 土壤三相比 于灌浆期采用 3 点取样,用环刀分别取 0~20、20~40、40~60 cm 土层原状土。用 DIK-1601 土壤三相测量仪分析土壤三相比。

$$STPSD = [(X_g - 50)^2 + (X_g - 50)(X_g - 25) + (X_y - 25)^2]^{0.5}$$

$$GSSI = [(X_g - 25) X_y X_q]^{0.4769}$$

式中:STPSD 为土壤三相结构距离;GSSI 为广义土壤结构指数; X_g 为固相体积百分比(>25%); X_y 为液相体积百分比(>0); X_q 为气相体积百分比(>0)。

1.2.2 根干重及空间分布的测定 于灌浆期采用 3 点取样,以玉米植株为中心按 1/2 株距 × 1/2 行距方法取 3 株,取土层 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm 带根土壤装入网袋中冲洗,将冲

洗干净 的根称鲜重。将根系均匀平铺于透射扫描仪,对根系进行扫描并保存为 JPG 文件,用 Win – Rhizo 软件分析得出根长、根表面积等数据。然后在恒温箱中 105℃杀青 15 min,85℃烘干至恒量,取出后分别称量根系重量。

1.2.3 产量测定 玉米收获前按照理论测产方法对各处理进行测产(籽粒含水量折成 14%),并随机留 20 个果穗风干后考种。

1.2.4 数据统计分析 用 SPSS 20.0 进行统计分析,Microsoft Excel 软件进行图表绘制。用 $LSD_{0.05}$ 检验处理间差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同深耕方式对土壤三相比的影响

理想的土壤三相比是固相 50%,液相和气相各 25%^[12-13], $GSSI$ 代表广义土壤结构指数,土壤结构越接近理想状态 $GSSI$ 越接近 100。 $STPSD$ 代表土壤三相结构距离,土壤三相结构越接近理想状态 $STPSD$ 值越接近 0。深耕后耕层土壤密度和含水量等物理性状均发生变化,土壤三相比重新分配,相应的 $GSSI$ 和 $STPSD$ 也发生变化,因此可以通过 $GSSI$

和 $STPSD$ 来评价深耕对土壤物理结构的影响。

由表 1 可见,不同耕作方式下土壤三相比均表现为随土层深度增加气相比呈下降趋势,液相比和固相比呈上升趋势,整体上各深耕处理固相比较 CK 有所降低,气相比和液相比有所升高。在 0 ~ 60 cm 土层各深耕处理与 CK 相比均有较大的 $GSSI$ 值和较小的 $STPSD$ 值,说明深耕对土壤物理结构的改善有积极的作用。在 0 ~ 20 cm 土层各深耕处理的 $GSSI$ 值均大于 CK, $STPSD$ 值小于 CK,土壤结构较为合理,但各处理间没有显著差异。在 20 ~ 40 cm 土层,SF 土壤物理结构最为合理, $GSSI$ 值较 CK 提高了 36.12%, $STPSD$ 值较 CK 降低了 28.75%,与 CK 间存在显著差异,SS 和 TS 与 CK 无显著差异。在 40 ~ 60 cm 土层,SS 和 SF 处理的 $GSSI$ 值分别高于 CK 3.74%和 3.83%, $STPSD$ 值低于 CK 30.64%和 32.84%,达到了显著差异水平,土壤物理结构较为合理,TS 与 CK 无显著差异。

从以上的数据可以看出,各深耕处理均可有效改良土壤物理结构,其中 SF 20 ~ 60 cm 土层土壤物理结构显著好于 CK,40 ~ 60 cm 土层土壤物理结构 SS 显著好于 CK,SS 和 SF 的作用效果好于 TS 处理。

表 1 不同深耕方式对土壤三相比的影响

Table 1 Influence of different deep tillage methods on three-phase ratios of soil

土层/cm Soil layer	处理 Treatments	气相/% Gas phase	液相/% Liquid phase	固相/% Solid phase	$GSSI$	$STPSD$
0 ~ 20	CK	25.58 ± 0.18 ab	15.25 ± 0.76 b	59.16 ± 0.81 a	92.68 ± 1.26 a	9.47 ± 0.78 a
	TS	26.29 ± 1.32 ab	17.22 ± 0.72 a	56.49 ± 1.38 ab	95.64 ± 0.84 a	7.29 ± 0.73 a
	SS	24.94 ± 4.20 b	17.45 ± 2.73 a	57.61 ± 2.78 ab	94.65 ± 2.59 a	8.10 ± 2.06 a
	SF	29.77 ± 1.44 a	16.07 ± 1.11 ab	54.15 ± 0.69 b	94.64 ± 1.41 a	7.78 ± 0.95 a
20 ~ 40	CK	21.92 ± 1.99 b	16.85 ± 2.35 b	61.23 ± 0.69 a	92.47 ± 2.16 b	10.18 ± 1.07 a
	TS	22.19 ± 0.52 b	18.62 ± 1.03 a	59.19 ± 0.57 ab	95.26 ± 0.82 ab	8.17 ± 0.64 ab
	SS	24.99 ± 2.91 a	18.14 ± 4.78 a	56.87 ± 2.44 b	95.08 ± 3.74 ab	7.25 ± 3.22 ab
	SF	25.11 ± 0.64 a	18.46 ± 1.12 a	56.43 ± 1.75 b	96.62 ± 1.30 a	6.50 ± 1.40 b
40 ~ 60	CK	20.58 ± 0.75 a	17.87 ± 0.61 c	61.55 ± 0.98 a	93.04 ± 1.07 b	10.10 ± 0.84 a
	TS	21.51 ± 2.45 a	18.41 ± 2.37 bc	60.08 ± 1.17 a	94.10 ± 1.11 b	9.08 ± 0.90 a
	SS	20.71 ± 1.93 a	21.36 ± 1.30 ab	57.94 ± 0.63 b	96.52 ± 0.53 a	7.01 ± 0.54 b
	SF	20.55 ± 2.22 a	22.12 ± 2.35 a	57.53 ± 0.43 b	96.61 ± 0.14 a	6.84 ± 0.19 b

注:表中小写字母表示 5%显著水平。下同。
Note: Lowercase letters indicated significance at 5% level. The same below.

2.2 不同深耕处理对玉米根系构型的影响

由表 2 可见,深耕处理显著提高了玉米根系的根干重、根长和根表面积。根干重、根长和根表面积均表现为 SF > SS > TS > CK。各深耕处理的根干重与 CK 间差异显著,TS、SS、SF 分别较 CK 提高了

20.13%、35.52%和 39.62%。各处理间在根长上的差异达到了显著水平,TS、SS、SF 分别较 CK 提高了 14.81%、33.21%和 77.79%。根表面积 TS、SS、SF 分别较 CK 提高了 3.65%、6.42%和 24.03%,其中 SS、SF 与 CK 间差异显著。

表 2 0~60 cm 土层单株根干重、根长和根表面积的变化

Table 2 Variations of dry root weight, length, and root surface area in 0~60 cm layer

处理 Treatments	根干重/g Dry root weigh	根长/m Root length	根表面积/cm ² Root surface area
CK	12.67 ± 1.07 c	298.05 ± 6.43 d	6412.64 ± 82.93 c
TS	15.22 ± 0.92 b	342.20 ± 2.03 c	6646.91 ± 26.81 bc
SS	17.17 ± 1.05 ab	397.03 ± 11.31 b	6824.02 ± 185.51b
SF	17.69 ± 0.37 a	529.91 ± 6.72 a	7953.46 ± 179.90 a

2.2.1 不同深耕方式对各土层玉米根长的影响

由图 1 可以看出,在 10~60 cm 土层除 TS 在 10~20 cm 土层略低于 CK 外,其它深耕处理各土层根长均高于 CK。SF 在 10~50 cm 土层根长显著高于 CK,分别较 CK 提高了 97.8%、258.3%、173.3% 和 25.7%,并且在 10~40 cm 土层显著高于其他处理。SS 在 20~50 cm 土层根长显著高于 CK,分别较 CK 提高了 20.6%、208.6% 和 262.7%。TS 在 20~30 cm 以及 50~60 cm 土层根长较 CK 显著提高了 40.2% 和 201.3%。

从直径在 0.5 mm 以下的细根在 0~60 cm 土层分布情况(图 2)可以看出,各处理 0.5 mm 径级以下的细根长占总根长比例分别为 51.62% (CK)、72.48%(TS)、57.40% (SS) 和 66.05% (SF),各深耕

处理的细根长占总根长比例均要高于 CK,说明深耕处理可以明显提高土壤中细根长的比例。SF 在 10~50 cm 土层细根长显著高于 CK,分别较 CK 提高了 350.8%、692.8%、100.0% 和 700.1%,并且在 10~30 cm 土层细根长显著高于其他处理。SS 在 40~50 cm 土层细根长与 CK 存在显著差异,其他土层细根长虽高于 CK 但无显著差异。TS 在 0~10 cm 以及 40~60 cm 土层细根长高于 CK 69.3%、544.5% 和 1377.1%。

2.2.2 不同深耕方式对玉米根表面积的影响

由图 3 可以看出,随着土层深度的增加,玉米根系的表面积总体上表现出不断下降的趋势,其中 SF 在 10~20 cm 土层根表面积达到峰值之后不断下降;TS 在 0~10 cm 土层根表面积为最大值,之后不断下降,但在 50~60 cm 土层较上一土层有所增长;SS 和 CK 在 0~60 cm 土层随土层深度增加根表面积不断下降。在 20~50 cm 土层 SF 玉米根系的表面积显著高于 CK,各土层分别较 CK 提高了 50.9%、46.5% 和 176.5%。TS 除 30~40 cm 土层外,在 10~60 cm 土层根表面积均高于 CK,并且在 0~10、50~60 cm 土层差异达到显著水平,分别较 CK 提高了 19.4% 和 719.2%。SS 在 0~60 cm 土层根表面积均高于 CK,其中在 40~50 cm 土层差异显著,较 CK 提高了 594.9%,其他土层差异不显著。

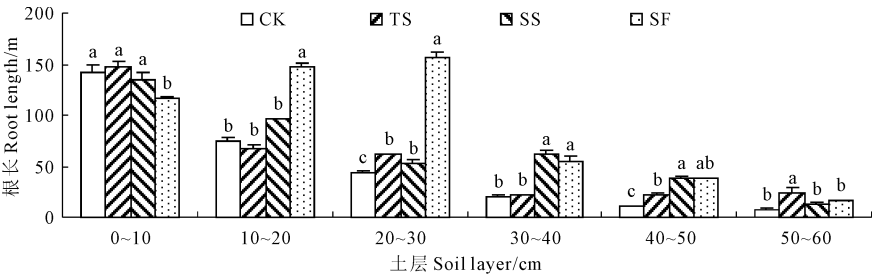


图 1 不同土层根长分布情况

Fig.1 Root length distributions in different soil layers

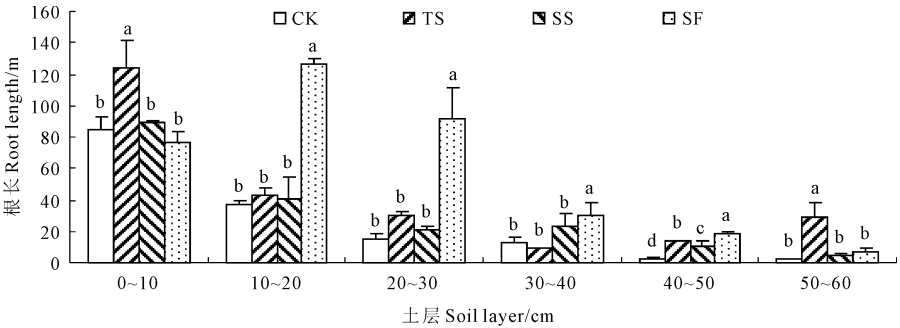


图 2 不同土层 0.5 mm 径级以下细根长分布情况

Fig.2 Root length distributions of fine roots with 0.5 mm diameter and less in different soil layers

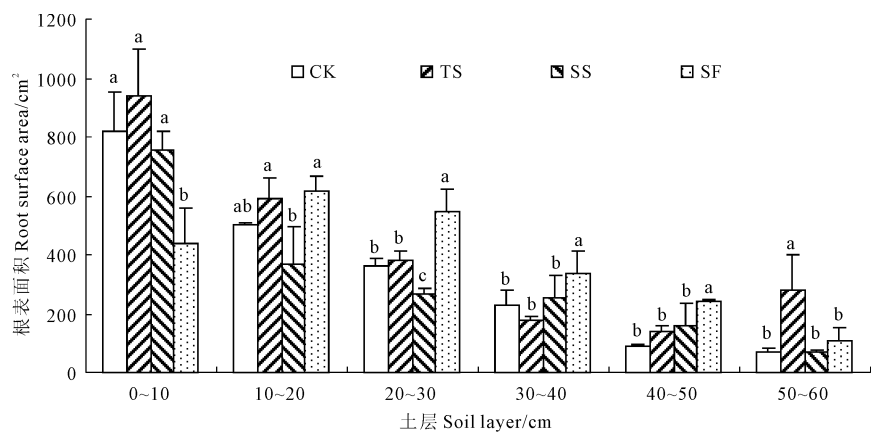


图 3 不同土层根表面积分布情况

Fig.3 Root surface area distributions in different soil layers

通过图 4 可以看出,0.5 mm 以下径级玉米根系表面积分布与玉米根系总表面积分布趋势相似,SF 在 20~50 cm 土层根表面积显著高于 CK,各土层分别较 CK 提高 193.23%、444.00%、172.56% 和

542.44%,并且在 20~40 cm 土层显著高于其他深耕处理。SS 在 0~60 cm 土层根表面积均高于 CK,但各土层差异不显著。TS 在 50~60 cm 土层显著高于 CK,较 CK 提高了 999.8%,其他土层差异不明显。

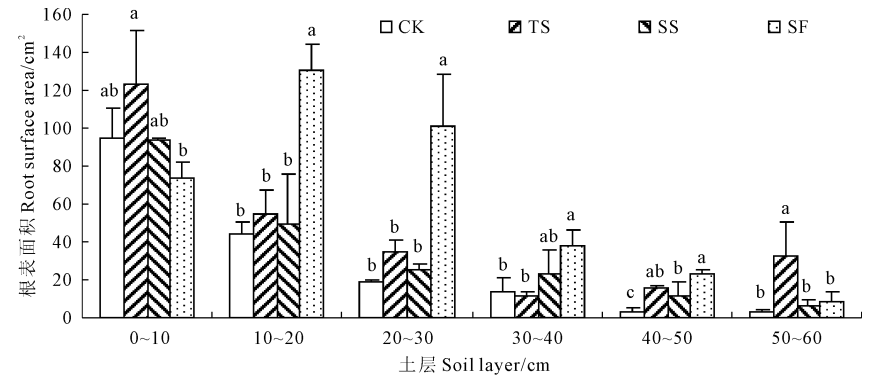


图 4 不同土层 0.5 mm 径级以下细根表面积分布

Fig.4 Surface area distributions of fine roots with 0.5 mm diameter and less in different soil layers

2.2.3 不同径级根系的根长密度和根表面积密度的变化 根据根系径级和数据集中程度,将 0.5 mm 以下径级细根系分成 5 个径级区间:0.0 mm < RD ≤ 0.1 mm;0.1 mm < RD ≤ 0.2 mm;0.2 mm < RD ≤ 0.3 mm;0.3 mm < RD ≤ 0.4 mm;0.4 mm < RD ≤ 0.5 mm 进行根长和根表面积分析(图 5、图 6)。

在 0~0.5 mm 径级范围内的细根,0.1~0.2 mm 径级的细根所占比例最大,其中 CK 为 26.06%,深耕处理为 37.98%~40.23%,显著高于其它径级细根所占总根长的比例。根表面积的峰值则出现在 0.1~0.4 mm 径级间,该区间根表面积百分比分别 12.94% (CK)、22.65% (TS)、15.79% (SS)和 17.19% (SF)。

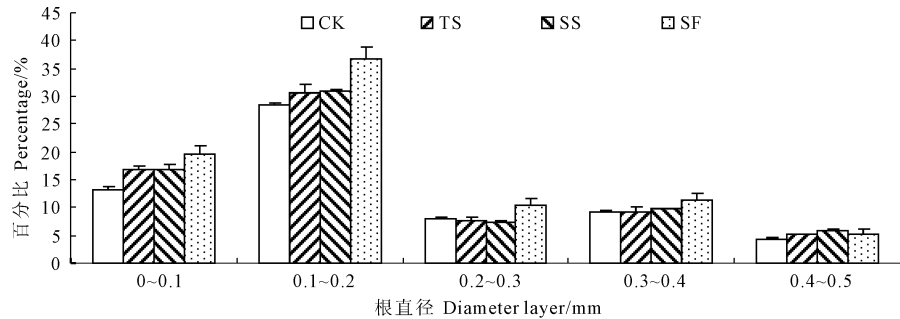


图 5 不同径级根长占总根长百分比

Fig.5 Percentages of roots with different diameters to the total root length

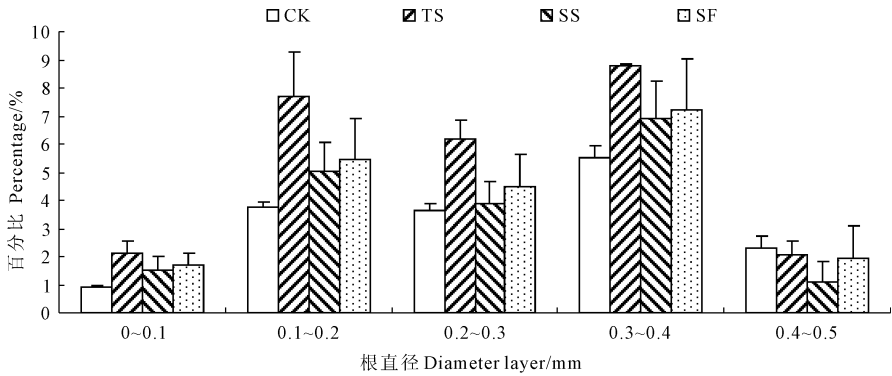


图 6 不同径级根表面积占总表面积百分比

Fig.6 Percentages of roots with different surface areas to the total root surface area

2.3 土壤三相比与细根长、细根表面积的相关性分析

由细根长和细根表面积与土壤三相的相关性分析可以看出(表 3、表 4),细根长与气相比呈极显著正相关,相关系数为 0.930;与液相比呈显著负相关,相关系数为 -0.580;与固相比呈极显著负相关,相关系数为 -0.718。细根表面积与土壤三相的相关性与细根长类似,细根表面积与气相比呈极显著正相关,相关系数为 0.919;与液相比和固相比呈显著负相关,相关系数分别为 -0.590 和 -0.700。

2.4 不同深耕方式对玉米产量及其构成因素的影响

由表 5 可见,TS、SS、SF 产量均高于 CK,分别较 CK 增产 7.89%、11.74%、17.02%,其中 SF 产量最高并且与 CK 达到显著差异,三种深耕处理间表现为 SF>SS>TS,但差异不显著。

各处理间亩穗数表现为 SF>SS>CK>TS,但差异不显著;穗粒数表现为深耕处理显著高于 CK,总体表现为 SS>TS>SF>CK,各深耕处理间差异不显著;千粒重深耕处理略高于 CK,各处理表现为 SF>SS>TS>CK,各处理间差异不显著。

综合以上分析可知,除 TS 亩穗数低于 CK 外,其他产量构成因素深耕处理均高于 CK,其中深翻处

理的穗粒数与 CK 间差异达到了显著水平。

表 3 细根长与土壤三相值相关性分析

Table 3 Correlation analyses between fine root lengths and soil three phase ratios

项目 Item	气相 Gasphase	液相 Liquidphase	固相 Solidphase	根长 Root length
气相 Gasphase	1.000	-0.670 *	-0.730 **	0.930 **
液相 Liquidphase		1.000	-0.080	-0.587 *
固相 Solidphase			1.000	-0.718 **
根长 Root length				1.000

注: * 代表 $P < 0.05$ 的显著水平; * * 代表 $P < 0.01$ 的显著水平。下同。

Note: * indicated a significance level at $P < 0.05$, * * indicated a significance level at $P < 0.01$. The same below.

表 4 细根表面积与土壤三相值相关性分析

Table 4 Correlation analyses between fine root surface areas and soil three phase ratios

项目 Item	气相 Gasphase	液相 Liquidphase	固相 Solidphase	根表面积 Root surface area
气相 Gasphase	1.000	-0.670 *	-0.730 **	0.919 **
液相 Liquidphase		1.000	-0.080	-0.590 *
固相 Solidphase			1.000	-0.700 *
根表面积 Root surface area				1.000

表 5 不同深耕方式对春玉米产量的影响

Table 5 Influences of different deep tillage methods on spring maize yield

处理 Treatments	穗数/(穗·667m ⁻²) Ears per 667m ²	穗粒数/粒 Kemels number per ears	千粒重/g 1000-kernel weight	产量/(kg·hm ⁻²) Yield
CK	5177 ± 88.07 a	643 ± 7.00 b	319 ± 12.59 a	12583.5 ± 64.76 b
TS	5145 ± 79.76 a	689 ± 1.00 a	328 ± 11.14 a	13587.15 ± 42.44 ab
SS	5211 ± 109.49 a	693 ± 6.56 a	333 ± 9.54 a	14061.15 ± 34.18 ab
SF	5270 ± 108.17 a	675 ± 3.11 a	344 ± 3.61 a	14725.8 ± 28.03 a

3 讨论

陈祥伟^[14]等研究表明大机械作业后耕层土壤三相比大幅逼近理想状态,对土壤结构有明显的改良作用。本研究结果表明,深耕处理与CK相比具有较大的GSSI值和较小的STPSD值,耕层土壤结构更加逼近理想状态,说明深耕可以有效地改善土壤物理结构。SF在20~40 cm土层的GSSI和STPSD均显著优于CK,SS在40~60 cm土层的GSSI和STPSD均显著优于CK,TS在各土层与CK间无显著差异,说明SF显著改善了耕层20~60 cm土层的土壤物理结构,SS对40~60 cm土层土壤结构的改良效果较为明显,SS和SF的作用效果好于TS。随着土层的加深土壤的气相比不断下降,液相比和固相比不断上升。在20~60 cm土层,深耕处理条件下土壤的气相比和液相比均高于常规浅旋耕处理,并且降低了土壤的固相比,实现了土壤中气、液、固三相的重新分配。

李潮海等^[15]与Logdonsd等^[16]在玉米苗期试验中发现,随着容重的增加,玉米幼苗根长度线性减少,根径粗线性增加。Barraclough试验证明,土壤中紧实层的存在改变了小麦根系在土壤剖面上的正常分布,犁底层上部的根量明显增多,而犁底层下部根量骤减^[17]。本研究结果表明,深耕处理总根长显著高于常规浅旋耕处理,尤其是土壤的中下层(20~50 cm)各土层,深耕处理的根长高于常规浅旋耕处理,并且0~0.5 mm径级的细根含量也均显著高于CK。深耕处理有效增加了玉米根系的总表面积,其中SF显著提高了土壤中下层(20~50 cm)的根表面积,并且0~0.5 mm细根的根表面积也显著高于其他处理。

孙景生等^[18]研究表明根系长度以0.25~0.45 mm径级的根系所占比例最大,在根尖数和根系表面积分布中以0~0.25 mm径级的根系为主。本研究结果表明,在0~60 cm土层深耕条件下玉米的细根总根长均显著高于常规浅旋耕处理,在10~60 cm各土层除30~40 cm TS处理外,深耕处理的细根长均高于常规浅旋耕处理,其中SF在10~50 cm土层细根长显著高于CK。0.1~0.3 mm径级细根表面积占根系总表面积比例较大,与前人研究结果一致,但0~0.2 mm径级的根长占总根长的比例较大,与前人研究结果存在差异,这种差异可能是由于犁底层的存在限制了玉米根系纵向的伸长,增加了横向的生长,使得玉米根系直径增加,深耕打破了土壤犁底层,消除了犁底层对根系生长的阻碍作用,使根系

直径变细,增加了土壤中细根的含量。

杨丽韞等^[19]研究结果表明,作物细根的生长主要受土壤中空气、水分及养分含量的影响。本试验通过土壤三相比与细根长和细根表面积相关分析表明,土壤气相比与细根长和细根表面积呈显著正相关,液相比、固相比与细根长和细根表面积呈显著负相关。说明深耕处理通过改变土壤的物理结构,降低土壤中下层的固相比增加气相比和液相比,促进耕层中下层玉米细根的生长。

4 结论

深耕提高了土壤结构指数(GSSI),降低了土壤三相结构距离(STPSD),使耕层土壤物理结构更加逼近理想状态,并且对土壤中气相、液相、固相三相比的分配产生了较大的影响,增加气相比和液相比,降低固相比。深耕改善了玉米根系的构型,促进玉米根系下扎,增加了玉米的总根长和总表面积,提高了土壤中下层根系的生物量,使细根的根长和表面积所占的比例增加。土壤三相比与细根的生长具有一定的相关性,土壤气相比与玉米根系的细根长和细根表面积呈极显著正相关关系,而液相比和固相比则与其呈显著负相关关系。土壤气相比、液相比和固相比共同影响玉米根系的生长,最终提高玉米产量。

参考文献:

- [1] 李铁冰,逢焕成,李 华.条深旋耕作对黄淮海北部春玉米籽粒灌浆及产量的影响[J].中国农业科学,2013,46(14):3055-3064.
- [2] 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.
- [3] Sullivan W M, Jiang Z C, Hull R J. Root morphology and its relationship with nitrate uptake in Kentucky bluegrass[J]. Crop Sci, 2000, 40:765-772.
- [4] Zobel R W. Sensitivity analysis of computer based diameter measurement from digital images[J]. Crop Sci, 2003,43:583-591.
- [5] Salgado E, Cautín R. Avocado root distribution in fine and coarse-textured soils under drip and micro sprinkler irrigation[J]. Agric Water Manag, 2008,95:817-824.
- [6] 李潮海,梅沛沛,王 群.下层土壤容重对玉米植株养分吸收和分配的影响[J].中国农业科学,2007,40(7):1371-1378.
- [7] 李潮海,李胜利,王 群.下层土壤容重对玉米根系生长及吸收活力的影响[J].中国农业科学,2005,38(8):1706-1711.
- [8] Millikin CS, Bledsoe CS. Biomass and distribution of fine and coarse roots from blue oak (*Quercus douglasii*) trees in the northern Sierra Nevada foothills of California[J]. Plant and Soil, 1999,214:27-38.
- [9] 刘殿英,黄炳茹,董庆裕.土壤水分对冬小麦根系的影响[J].山东农业大学学报,1991,22(2):103-110.

小麦增产,不同覆膜方式小麦增产幅度表现为全膜覆土穴播技术>全膜平铺穴播技术>膜侧沟播技术。3个旱作区,全膜覆土穴播、全膜平铺穴播、膜侧沟播3种覆膜方式小麦较对照平均增产率分别为73.9%、60.3%和33.3%。

2) 3种覆膜方式均能较对照极显著地提高旱地小麦产量,不同覆膜方式小麦增产量表现为全膜覆土穴播技术>全膜平铺穴播技术>膜侧沟播技术。3个旱作区,全膜覆土穴播、全膜平铺穴播、膜侧沟播小麦较对照平均增产量分别为2 457.9、2 007.2、1 045.9 kg·hm⁻²。

3) 不同旱作区3种覆膜方式小麦增产幅度均明显地表现为半干旱偏旱区>半干旱区>半湿润偏旱区,但以全膜覆土穴播小麦增幅最高。3个旱作区全膜覆土穴播小麦较对照增产率分别为90.2%、73.7%和57.8%,全膜平铺穴播小麦较对照增产率分别为73.2%、60.9%和46.9%,膜侧沟播小麦较对照增产率分别为49.7%、32.7%和17.5%。

4) 不同旱作区全膜覆土穴播和全膜平铺穴播小麦增产量表现为半湿润偏旱区>半干旱区>半干旱偏旱区,而膜侧沟播小麦增产量则表现为半干旱偏旱区>半干旱区>半湿润偏旱区。较对照增产量,3个旱作区全膜覆土穴播小麦分别为2 220.3、2 520.9、2 632.5 kg·hm⁻²,全膜平铺穴播小麦分别为1 802.5、2 082.6、2 136.6 kg·hm⁻²,而膜侧沟播小

麦分别为1 222.7、1 119.0、795.3 kg·hm⁻²。
5) 不同覆膜方式小麦的经济效益以全膜覆土穴播技术最为显著。全膜覆土穴播、全膜平铺穴播、膜侧沟播及露地条播小麦的产投比分别为3.01、2.05、2.25元·元⁻¹和1.86元·元⁻¹。全膜覆土穴播技术与全膜平铺穴播技术、膜侧沟播技术及露地条播技术相比,具有极显著的经济效益。

参 考 文 献:

[1] 崔金梅,郭天财,朱云集,等.小麦的穗[M].北京:中国农业出版社,2008:290-301.
[2] 赵广才,常旭虹,王德梅,等.中国小麦生产发展潜力研究报告[J].作物杂志,2012,(3):1-5.
[3] 李 福,李城德,刘广才,等.甘肃发展旱地全膜覆土穴播技术的重要意义[J].农业科技与信息,2010,(23):3-4,27.
[4] 李 福,李城德,刘广才,等.旱地全膜覆土穴播免耕多茬种植技术[J].中国农技推广,2011,27(1):24-25,19.
[5] 李 福,刘广才.甘肃省小麦全膜覆土穴播技术的增产效果[J].农业科技与信息,2011,(23):3-4.
[6] 何春雨,周祥椿,杜久元,等.全膜覆土免耕穴播栽培技术对冬小麦产量效应的研究[J].农业现代化研究,2010,31(6):746-749.
[7] 侯慧芝,吕军峰,张绪成,等.陇中半干旱区全膜覆土穴播小麦的土壤水分及产量效应[J].作物杂志,2010,(1):21-25.
[8] 刘晓伟,何宝林,康恩祥,等.播种方式对旱区冬小麦产量及土壤水分、土壤温度的影响[J].作物杂志,2011,(5):77-81.
[9] 李 福,刘广才,李城德,等.旱地小麦全膜覆土穴播技术的土壤水分效应[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):73-78,98.

(上接第 7 页)

[10] Hoffman A, Kummerow J. Root studies in the Chilean m attora[J]. Oecologia, 1978,32:57-69.
[11] Kummerow J, K raise D, Jow W. Root system of chaparral shrub [J]. Oecologia, 1977,29:163-177.
[12] Unger PW. Over winter changes in physical-properties of no-tillage soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991,55:778-782.
[13] Herrmann A, Witter E. Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils[J]. Soil Biology& Biochemistry, 2002,34:1495-1505.
[14] 王恩姮,陈祥伟.大机械作业对黑土区耕地土壤三相与速效养分的影响[J].水土保持学报,2007,8(4):98-102.
[15] 李潮海,周顺利.土壤容重对玉米苗期生长的影响[J].华北农学报,1994,9(2):49-54.
[16] Logdon S D, Reneaurb. Effects of soil physical characteristics on root growth of Maize Seedling[J]. Foreign agriculture – Maize, 1990, 79 (2):16-20.
[17] Barracloughpb, Weirah. Effects of a compacted subsoil lager on root and shoot growth, water use and nutrient uptake of winter wheat[J]. Agricultural Science, 1988,110:207-216.
[18] 李彩霞,孙景生,周新国,等.隔沟交替灌溉条件下玉米根系形态性状及结构分布[J].生态学报,2011,31(14):3956-3963.
[19] 杨丽韞,罗天祥,吴松涛.长白山原始阔叶红松林及其次生林细根生物量与垂直分布特征[J].生态学报,2007, 27: 3609-3712.
[20] 李永平,王孟本,史向远.不同耕作方式对土壤理化性状及玉米产量的影响[J].山西农业科学,2012,40(7):723-727.