作物学报 ACTA AGRONOMICA SINICA 2020, 46(5): 759–771 http://zwxb.chinacrops.org/
ISSN 0496-3490; CN 11-1809/S; CODEN TSHPA9 E-mail: zwxb301@caas.cn

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.93044

耕层构造对土壤三相比和春玉米根系形态的影响

白 伟[1] 孙占祥[1,*] 张立祯[2,*] 郑家明[1] 冯良山[1] 蔡 倩[1]
向午燕[1] 冯 晨[1] 张 哲[1]

[1] 辽宁省农业科学院耕作栽培研究所, 辽宁沈阳 110161; [2] 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

摘 要: 建立适宜耕层构造是解决旱作农田耕层“浅”、“实”、“少”问题的重要技术措施之一, 对北方旱作农田具有重要意义。在国家农业环境阜新科学观测实验站利用长期定位试验, 设置虚实并存耕层(furrow loose and ridge compaction plough layer, FLRC)、全虚耕层(all loose plough layer, AL)、全实耕层(all compaction plough layer, AC)、上虚下实耕层(up loose and down compaction plough layer, ULDC, CK) 4 种处理, 研究耕层构造对土壤三相比和春玉米根系形态的影响。耕层构造定位试验始于 2009 年, 本文利用 2015 年和 2016 年数据分析果表明, 虚实并存耕层能够优化土壤三相比($P < 0.05$), 春玉米播种前 0~10 cm 土壤三相比以全实耕层构造为宜, 10~30 cm 以虚实并存和全虚耕层构造为宜; 春玉米收获后 20~30 cm 土壤三相比的虚实并存和全虚耕层构造优于上虚下实耕层和全实耕层构造。虚实并存耕层构造能够增加春玉米吐丝期根重密度、根长密度、根表面积密度和根体积密度($P < 0.05$); 其中春玉米根重密度增幅 7.47%~97.09%, 根长密度增幅 6.62%~112.04%, 根表面积密度增幅 9.80%~125.07%, 根体积密度增幅 40.11%~151.97%。虚实并存耕层可以显著增加春玉米籽粒产量($P < 0.05$), 增幅 18.19%~34.86%, 主要原因是行粒数的显著提高和秃尖的降低; 还增加群体生物产量($P < 0.05$), 增幅 5.18%~11.30%; 和提高收获指数($P < 0.05$)。综合分析认为, 虚实并存耕层是改善土壤三相结构和优化春玉米根系形态的最优耕层结构, 在辽西旱作农田合理耕层构建中具有一定的应用价值。

关键词: 耕作; 耕层构造; 土壤三相比; 春玉米; 根系形态

Effects of plough layer construction on soil three phase rate and root morphology of spring maize in northeast China

BAI Wei[1], SUN Zhan-Xiang[1,*], ZHANG Li-Zhen[2,*], ZHENG Jia-Ming[1], FENG Liang-Shan[1], CAI Qian[1], XIANG Wu-Yan[1], FENG Chen[1], and ZHANG Zhe[1]

[1] Tillage and Cultivation Research Institute, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, Liaoning, China; [2] College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract: Establishing reasonable plough layer construction is regarded as one of important methods for solving some rainfed farmland problems, which is of great significance in the dryland of northern China. The experiment was conducted with four tillage treatment, including furrow loose and ridge compaction plough layer (FLRC), all loose plough layer (AL), all compaction

本研究由中国博士后科学基金项目(2017M620103), 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1807051), 中央引导地方科技发展专项资金项目(2019040005-JH6/104), 国家重点研发计划项目(2016YFD0300204), 辽宁省自然科学基金计划重点项目(20180540004), 辽宁省“百千万人才工程”项目项目(201746), 辽宁省农业科学院学科建设计划项目(2019DD062010)和农业科研杰出人才及其创新团队项目资助。

This study was supported by the China Postdoctoral Science Fund(2017M620103), the Liaoning Revitalization Talents Program (XLYC1807051), the Central Government Guides Local Science and Technology Development Projects (2019040005-JH6/104), the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300204), the Liaoning Natural Science Foundation Project Key Projects (20180540004), the “Liaoning Bai-Qian-Wan Talent” Program (201746), the Liaoning Academy of Agricultural Sciences Discipline Construction Plan (2019DD062010), and the Outstanding Talents in Agricultural Scientific Research and Their Team.

* 通信作者(Corresponding authors): 孙占祥, E-mail: sunzx67@163.com; 张立祯, E-mail: zhanglizhen@cau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: libai200008@126.com

Received (收稿日期): 2019-08-05; Accepted (接受日期): 2019-12-26; Published online (网络出版日期): 2020-01-16.

URL: http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.s.20200115.1618.030.html

plough layer (AC), up loose and down compaction plough layer (ULDC, CK), at Fuxin National Agricultural Environmental Science Observation Experimental Station, at which the long-term plough layer construction position fixed experiment began in 2009. The data in 2015 and 2016 showed that the FLRC treatment optimized ($P < 0.05$) the soil three phase rate, which in 0−10 cm soil layer was optimized by AC treatment before spring corn sowing, while in 10−30 cm soil layer was optimized by FLRC and AL treatments. After the spring corn was harvested, the soil three phase's rate in 20−30 cm soil layer in FLRC and AL treatments was better than that in ULDC and AC treatments. Compared with the ULDC treatment, FLRC treatment increased ($P < 0.05$) the root weight density by 7.47%−97.09%, the root length density by 6.62%−112.04%, the root surface area density by 9.80%−125.07%, and the root bulk density by 40.11%−151.97% at silking period in spring corn. The FLRC treatment significantly increased the yield of spring maize by 18.19%−34.86% ($P < 0.05$) due to the significant increase in number of grains and the decrease of baldness, increased the population biomass by 5.18%−11.30% ($P < 0.05$), and improved the harvest index ($P < 0.05$). In conclusion, the furrow loose and ridge compaction plough layer is the optimal construction for improving soil three phase rate and root morphology of spring maize, with certain application value in the construction of reasonable plough layer of dry farmland in northern China.

Keywords: tillage; layer construction; soil three phase rate; spring maize; root morphology

东北地区是我国最典型的春玉米一年一熟种植区, 春玉米播种面积占全国玉米总播种面积 30%以上, 产量占全国玉米总产量 29%以上[1]。辽宁省是我国 13 个粮食主产区之一, 春玉米种植面积每年稳定在 200 万公顷以上, 其中辽西北地区占 2/3 以上, 产量占辽宁省 75%以上[2], 该区长期采用连年浅旋耕的耕作措施, 造成了玉米田耕层变浅、土壤紧实、耕层有效土壤量减少等问题, 导致土壤理化性状日益恶化, 根系生长受阻, 玉米产量低而不稳[3]。改善耕层构造是解决北方旱地耕层障碍问题的有效途径之一[4-8], 合理的耕层构造能够打破犁底层, 增加耕层厚度、降低土壤容重、调节土壤三相比[9-11], 促进作物根系生长[12-13], 提高作物产量和水分利用效率[14-16]。因此, 东北春玉米区采用合理的耕层构造, 改善土壤环境, 促进根系生长对提高春玉米产量和水分利用效率具有重要意义。

耕层构造将直接影响土壤环境, 根系又是作物重要吸收和代谢器官, 耕层环境改变必将影响作物根系形态指标变化, 同时制约地上部生长[17-19]。已有研究表明, 不同耕层构造在优化耕层环境的同时[20-22], 可以影响作物根深、根长、根干重等根系形态指标[23-24]。适宜耕层构造可以明显促进作物根系生长和提高作物产量, 这可能与早期土壤水分无关, 但与作物根系形态指标有关, 因为茂盛根系可以增加对土壤水分和养分的吸收利用, 对后期根系生长有着积极作用, 为作物增产创造良好条件[25-26]。耕层土壤环境与作物根系是相互联系、相互促进的统一整体, 根系在耕层结构改变后首先会产生形态上适应性变化[24], 然而关于辽西褐土区耕层构造对土壤三相比和根系形态的影响研究还不够深入。本研究利用国家农业环境阜新科学观测实验站耕层构造长期定位试验, 探讨耕层构造对土壤三相比和春玉米根系形态的影响, 以期为东北春玉米区建立合理耕层结构提供理论和技术参考。

1 材料与方法

1.1 区域概况

辽宁半干旱区位于辽宁省西北部, 属温带季风大陆性气候区, 日照充足, 四季分明, 雨热同期。全区土地面积约3×10^4 km^2, 耕地面积约6.9×10^5 hm^2, 年平均气温7~8℃, 5月至9月份日照时数1200~1300 h, 10℃以上积温2900~3400℃, 无霜期135~165 d, 年降水量300~500 mm, 且降水变率较大, 旱灾频繁, “十年九旱”是其基本气候特征。当地耕作制度主要以一季春玉米连作为主, 土壤耕作多采用连年浅旋耕, 深度12~15 cm, 为上虚下实型耕层构造。

1.2 试验地点

试验在国家农业环境阜新科学观测实验站(辽西旱作农业典型类型区, 位于辽宁省阜新市阜新蒙古族自治县阜新镇沙扎兰村, 42°06′N、121°75′E)进行。耕层构造试验为实验站长期定位试验, 开始于2009年, 本研究选取了2015年和2016年数据。试验地土壤为褐土, 耕作层含有机质1.746 g kg^{-1}、全氮0.377 g kg^{-1}、全磷0.172 g kg^{-1}、全钾2.413 g kg^{-1}、速效氮194.85 mg kg^{-1}、速效磷50.38 mg kg^{-1}、速效钾113.78 mg kg^{-1}, pH 6.21, 田间持水量26.90%, 容重1.37 g cm^{-3}, 地势平坦, 无灌溉条件。2015年生育期内降雨量为276.80 mm (干旱年份), 平均温度为19.83℃; 2016年生育期内降雨量为520.80 mm (丰水年份), 平均温度为20.02℃ (图1)。

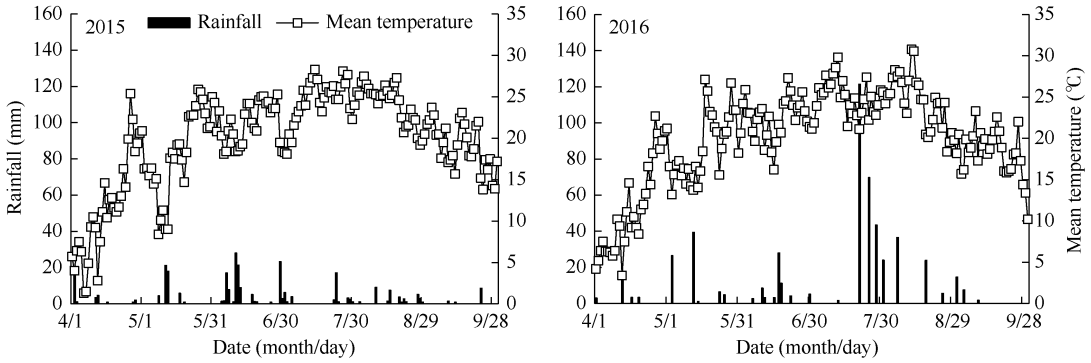


图 1　试验地点 2015–2016 年生育期内降雨量和平均温度

Fig. 1　Daily rainfall and mean temperature in growth period at experiment station in 2015–2016

1.3　试验设计

采用随机区组设计, 设置 4 种耕层构造, 分别为上虚下实耕层构造、全虚耕层构造、虚实并存耕层构造、全实耕层构造, 3 次重复。上虚下实耕层(up loose and down compaction plough layer, ULDC), 以每年春季传统旋耕机作业, 深度 12~15 cm, 为当地传统种耕作模式, 连续旋耕 7 年, 作为本研究对照(controlled trial, CK); 全虚耕层(all loose plough layer, AL), 从 2009 年开始每隔 1 年采用“V”型深松机作业, 深度 30~35 cm, 再用传统旋耕机旋耕, 已间隔深松 4 次; 虚实并存耕层(furrow loose and ridge compaction plough layer, FLRC), 以每年凿式深松机作业, 深度 25~30 cm, 宽幅 50 cm, 再用传统旋耕机旋耕, 连续隔行深松 7 年; 全实耕层(all compaction plough layer, AC), 采用每年免耕播种机直接播种, 连续免耕 7 年。每个小区面积 20 m × 6 m (12 垄), 试验区总面积 1440 m^2。2015 年 5 月 3 日播种、9 月 30 日收获; 2016 年 5 月 5 日播种, 9 月 29 日收获。品种为郑单 958, 种植密度为 60,000 株 hm^{-2}, 种植的行距为 50 cm, 株距为 33 cm。播种时施入含 N 18%, P_2O_5 46%的磷酸二铵 150 kg hm^{-2}和含 N、P_2O_5、K_2O 各 15%的三元复合肥 150 kg hm^{-2}作为种肥, 拔节期追施含 N 46%的尿素 450 kg hm^{-2}。

1.4　测定指标及方法

1.4.1　*产量及其构成因素、生物产量和收获指数*

玉米收获后, 从每个处理随机取 3 个具有代表性的 10 m^2 样区测产, 用水分仪测定水分, 按 14%含水量折合成公顷产量。从每个样区取 15 株, 按常规方法测定穗行数、行粒数、秃尖、百粒重等产量构成因素。从对应的 10 m^2 样区随机取连续植株 5 株, 称重后在烘箱 105℃杀青 60 min, 85℃烘至恒重称干重, 计算植株含水率, 然后根据鲜重和 5 株含水率平均值折合成公顷生物产量。收获指数 HI = GY/BY。式中 GY 为作物籽粒产量, kg hm^{-2}; BY 为作物生物产量, 单位 kg hm^{-2}。

1.4.2　*春玉米根系*　　春玉米吐丝期(2015 年 8 月 20 日、2016 年 8 月 21 日)采用直径为 10 cm、高为 10 cm, 体积为 785 cm^3 的柴油动力根钻取样, 取样位置为纵向 2 株玉米中间, 取样深度 100 cm, 每 10 cm 为一个层次, 3 次重复。将根钻中所有根系取出放于自封袋中, 冲洗干净后用 WinRHIZO Program (Canada)植物根系分析系统分析根长密度、根表面积密度和根体积密度, 最后将每一样品装入纸袋风干, 测定根干重(精确到 0.001 g)。

1.4.3　*土壤理化性状*　　播种前按常规方法[27]测定土壤基本理化性质。分别于玉米播种前(2015 年 5 月 3 日, 2016 年 5 月 5 日)和收获后(2015 年 9 月 30 日和 2016 年 9 月 29 日)采用环刀法测定不同土层(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm)的土壤容重, 每个小区测 3 次重复, 每个处理共 9 次重复。采用烘干法在玉米播种期和收获期测定 0~100 cm 土壤含水率, 每 10 cm 一个层次, 3 次重复。土壤三相比=土壤固体容积∶土壤液体容积∶土壤气体容积 = (100%−土壤总孔隙度)∶(土壤质量含水量×容重)∶[土壤总孔隙度–(土壤质量含水量×容重)], 土壤总孔隙度 = (1−容重/比重)×100, 其中土壤比重取值为 2.65[28]。

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

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

式中, STPSD (Soil Three-Phase Structure Distance)代表土壤三相结构距离, 土壤三相结构越接近理想状态 STPSD 越接近 0; GSSI (Generalized Soil Structure Index)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。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)。

1.5 数据处理与分析方法

用 Microsoft Excel 整理分析试验数据并作图, 用 SPSS 21.0 软件统计分析, 采用 Duncan's 法多重比较。

2 结果与分析

2.1 耕层构造对春玉米产量和构成因素的影响

耕层构造对春玉米产量影响显著(表 1)。2015 年 FLRC 和 AC 分别比 CK 增加 34.86%、33.64%, 差异显著(P<0.05), FLRC 和 AC 差异不显著(P>0.05), AL 与其他 3 个处理差异也不显著(P>0.05)。2016 年表现略有不同, FLRC 和 AL 分别比 CK 增加 29.81%、18.19%。年际间差异显著(P<0.05)。说明在不同降雨年型下耕层构造对春玉米产量有显著影响, 在干旱年份(2015 年)虚实并存耕层构造和全实耕层构造能够增加春玉米产量, 在丰水年份(2016 年)虚实并存耕层和全实耕层构造能够增加春玉米产量, 产量增幅 18.19%~34.86%。

产量构成因素方面, 2015 年成穗数和百粒重差异不显著(P>0.05), 穗行数 AC 比 CK 增加 13.23%, 差异显著(P<0.05), FLRC 与 CK 差异不显著(P>0.05); 行粒数 AC、FLRC、AL 分别比 CK 增加 33.05%、26.30%、18.98%, 差异显著(P<0.05), 秃尖长 AC 比 FLRC、CK 高 150.00%、88.68%, 差异显著(P<0.05), AL 与其他 3 个处理差异不显著(P>0.05); 2016 年成穗数、穗行数、秃尖长和百粒重差异不显著, 行粒数 AL 比 CK 增加 13.17%, 差异显著(P<0.05), 相关分析表明, 产量与行粒数呈极显著正相关(r = 0.954**), 与秃尖长呈负相关(r = −0.671)。由此表明, 耕层构造提高春玉米产量在产量构成因素方面的主要原因是行粒数显著提高和秃尖降低。

表 1 耕层构造对玉米产量及构成因素的影响

Table 1 Effect of plough layer constructions on maize yield and yield components

处理 Treatment	成穗数 Ear number (Ear hm^{-2})	穗行数 Kernel-row number per ear	行粒数 Number of kernels per row	秃尖长 Bare top length (cm)	百粒重 100-kernel weight (g)	籽粒产量(14%含水量) Yield (14% moisture content) (kg hm^{-2})
2015						
CK	64939.18±7734.35 a	14.13±0.60 b	24.60±1.04 b	0.53±0.11 b	28.88±0.92 a	6436.52±412.46 b
FLRC	57854.14±8309.26 a	15.20±0.33 ab	31.07±1.49 a	0.40±0.11 b	32.40±1.36 a	8630.47±304.33 a
AL	57263.75±5567.11 a	15.20±0.43 ab	29.27±1.87 a	0.77±0.15 ab	30.32±1.50 a	7600.27±756.73 ab
AC	51158.35±3577.10 a	16.00±0.28 a	32.73±1.19 a	1.00±0.22 a	32.32±0.77 a	8601.47±388.18 a
2016						
CK	54256.85±11273.36 a	14.20±0.46 a	32.87±2.20 b	0.15±0.08 a	38.33±0.87 a	9140.73±267.83 b
FLRC	54744.88±2891.83 a	15.60±0.35 a	36.80±1.13 ab	0.00±0.00 a	38.05±1.94 a	11865.41±318.71 a
AL	49325.71±1472.34 a	15.87±0.24 a	37.20±0.73 a	0.13±0.08 a	37.21±1.96 a	10803.56±410.85 a
AC	50291.29±3305.79 a	14.53±0.50 a	33.13±1.53 ab	0.20±0.10 a	37.98±0.91 a	9150.67±457.96 b
P 值 P-value						
处理 Treatment (T)	0.549	0.004	0.002	0.087	0.500	0.000
年份 Year (Y)	0.225	0.776	0.000	0.000	0.000	0.000
处理×年份 T×Y	0.861	0.051	0.031	0.009	0.480	0.022

数据为平均值±标准误, 同列标以不同小写字母的值在处理间 0.05 水平上差异显著。CK、FLRC、AL、AC 分别代表上虚下实耕层、虚实并存耕层、全虚耕层、全实耕层。

Data are mean ± SE; values followed by a different letter within a column are significantly different arnong treatments at $P \le 0.05$. CK, FLRC, AL, and AC represent up loose and down compaction plough layer, furrow loose and ridge compaction plough layer, all loose plough layer, and all compaction plough layer respectively.

2.2 耕层构造对春玉米生物产量和收获指数的影响

耕层构造对春玉米群体生物产量和收获指数影响显著(图 2)。2015 年群体生物产量 FLRC 和 AL 分别比 CK 增加 11.30%、6.04%, 差异显著(P<0.05)。2016 年群体生物产量表现不同, FLRC 比 CK 增加 5.18%, 差异显著(P<0.05); AC 和 CK 差异不显著(P>0.05)。2015 年群体收获指数 AC 比 CK 增加 31.27%, 差异显著(P<0.05), FLRC、AL 与 CK、AC 差异不显著(P>0.05)。2016 年群体收获指数表现不

同, FLRC 比 AC、CK 分别高 22.28%、23.38%, 差异显著(P<0.05)。两年之间差异不显著, 说明无论干旱年份还是丰水年份虚实并存耕层构造均能提高春玉米群体生物产量, 增幅 5.18%~11.30%; 干旱年份全实耕层构造能够提高春玉米收获指数, 丰水年份虚实并存耕层构造和全虚耕层构造能够提高春玉米收获指数。

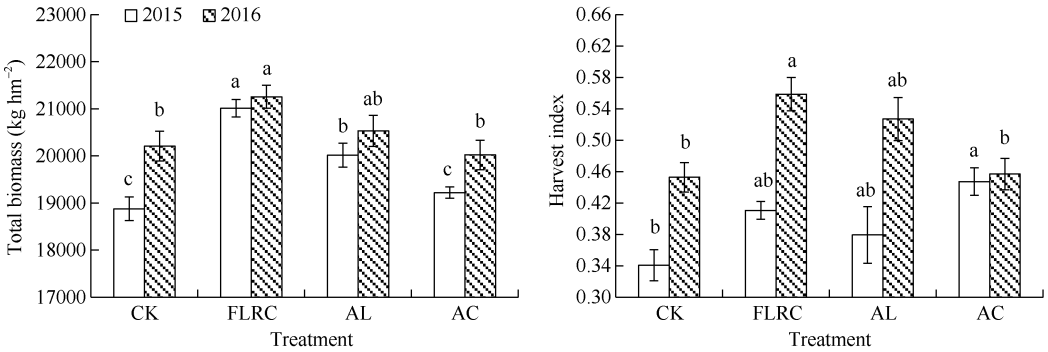


图 2　耕层构造对春玉米生物产量及收获指数的影响

Fig. 2　Effect of plough layer constructions on maize biomass and harvest index

标以不同字母的柱值在 P < 0.05 水平上差异显著。处理缩写同表 1。

Bars labelled with different letters are significantly different at P < 0.05. Abbreviations are the same as those described in Table 1.

2.3　耕层构造对土壤三相比的影响

春玉米播种前耕层构造对土壤三相比影响显著(P<0.05)(表 2), 2015 年 0~10 cm 土层固相 AC 与 FLRC、AL、CK 差异显著(P<0.05), 液相 AC 与 FLRC、AL、CK 差异显著(P<0.05), 气相 FLRC、AL 与 AC、CK 差异显著(P<0.05); GSSI 指标 AC 比 CK 高 9.70%, 差异显著(P<0.05); STPSD 指标差异不显著(P>0.05), 说明该层全实耕层构造土壤结构最接近理想状态。10~20 cm 土层固相 AC 与 FLRC、AL 差异显著(P<0.05); 液相差异不显著(P>0.05); 气相 AL 与 CK、FLRC、AC 差异显著(P<0.05); GSSI 指标差异不显著(P>0.05); STPSD 指标 AL 比 CK 低 47.79%, 差异显著(P<0.05), 该层全虚耕层构造土壤结构最接近理想状态。20~30 cm 土层固相 AC 与 FLRC、AL 差异显著(P<0.05); 液相差异不显著(P>0.05); 气相 AL 与 AC 和 CK 差异显著(P<0.05); GSSI 指标差异不显著(P>0.05); STPSD 指标 AL 比 CK 低 45.90%, 差异显著(P<0.05), 该层全虚耕层构造土壤结构最接近理想状态。2016 年 0~10 cm 土层固相 AC 与 CK、FLRC、AL 差异显著(P<0.05), 液相 AC 与 FLRC、AL、CK 差异显著(P<0.05), 气相 FLRC、AL、CK 与 AC 差异显著(P<0.05); GSSI 指标 AC 比 CK 高 9.12%, 差异显著(P<0.05); STPSD 指标差异不显著(P>0.05), 该层全实耕层构造土壤结构最接近理想状态。10~20 cm 土层固相 AC、CK 与 FLRC、AL 差异显著(P<0.05); 液相差异不显著(P>0.05); 气相 FLRC 与 AC、CK 差异显著(P<0.05); GSSI 指标 FLRC、AL 分别比 CK 低 52.46%、63.61%, 差异显著(P<0.05)。该层虚实并存和全虚耕层构造土壤结构最接近理想状态。20~30 cm 土层固相、液相、气相、GSSI 指标差异均不显著(P>0.05); STPSD 指标 AL 比 CK 低 31.63%, 差异显著(P<0.05), 该层全虚耕层构造土壤结构最接近理想状态。由此表明, 春玉米播种前无论是干旱年份还是丰水年份 0~10 cm 土壤三相比均以全实耕层构造为宜, 10~30 cm 土壤三相比以虚实并存和全虚耕层构造为宜。

表 2　春玉米播种前耕层构造对土壤三相比的影响

Table 2　Effect of plough layer constructions on three-phase ratio of soil in maize seeding

土层 Soil layer (cm)	处理 Treatment	固相 Solid phase (%)	液相 Liquid phase (%)	气相 Gas phase (%)	GSSI	STPSD
2015						
0–10	CK	45.41±0.25 b	12.29±0.16 b	42.30±0.16 b	83.14±0.24 b	9.43±0.29 a
	FLRC	42.01±0.67 c	12.17±0.73 b	45.82±1.37 a	78.68±2.61 c	9.62±1.19 a
	AL	41.64±0.33 c	11.75±0.14 b	46.62±0.21 a	77.30±0.19 c	10.34±0.06 a
	AC	50.06±0.25 a	14.52±0.31 a	35.42±0.55 c	91.20±0.66 a	10.58±0.11 a
10–20	CK	50.44±0.25 ab	16.35±0.60 a	33.21±0.69 b	94.23±0.89 a	9.29±0.64 a

(续表 2)

土层 Soil layer (cm)	处理 Treatment	固相 Solid phase (%)	液相 Liquid phase (%)	气相 Gas phase (%)	GSSI	STPSD
	FLRC	49.69±0.33 b	17.03±0.56 a	33.29±0.81 b	94.80±0.85 a	7.52±0.46 a
	AL	46.42±0.22 c	15.58±0.62 a	38.00±0.83 a	93.95±1.17 a	4.85±1.05 b
	AC	51.32±0.44 a	17.17±0.31 a	31.51±0.57 b	95.63±0.40 a	9.89±0.70 a
20–30	CK	52.08±0.87 a	19.51±0.23 a	28.42±0.67 b	98.03±0.09 a	9.39±1.69 a
	FLRC	50.82±0.33 ab	19.10±0.82 a	30.08±1.05 ab	97.42±0.79 a	7.60±0.54 ab
	AL	49.43±0.22 b	18.66±0.19 a	31.90±0.11 a	97.65±0.82 a	5.08±0.73 b
	AC	51.32±0.22 a	20.23±0.57 a	28.45±0.70 b	98.47±0.40 a	7.73±0.39 ab
2016						
0–10	CK	46.04±0.58 b	14.33±1.39 b	39.63±1.94 a	87.58±2.92 b	6.63±1.92 a
	FLRC	44.28±0.25 c	14.57±0.15 b	41.15±0.13 a	86.60±0.12 b	5.59±0.32 a
	AL	43.14±0.45 c	14.26±0.69 b	42.59±0.47 a	84.56±0.96 b	6.10±1.11 a
	AC	50.82±0.50 a	17.26±0.50 a	31.92±0.23 b	95.57±0.46 a	8.95±1.24 a
10–20	CK	51.07±0.33 a	18.88±1.22 a	30.05±1.51 b	97.12±1.06 a	8.33±0.47 a
	FLRC	47.42±0.33 b	16.63±0.91 a	35.95±1.11 a	97.49±0.39 a	3.96±1.64 b
	AL	48.55±0.67 b	18.83±1.11 a	32.62±1.75 ab	96.09±1.34 a	3.04±0.73 b
	AC	51.95±0.33 a	18.83±0.41 a	29.22±0.72 b	92.79±1.39 b	9.74±0.36 a
20–30	CK	53.08±0.50 a	21.06±1.37 a	25.85±1.86 a	98.53±0.68 a	10.78±0.31 a
	FLRC	52.45±0.22 a	21.22±0.67 a	26.33±0.81 a	99.03±0.26 a	9.41±0.36 a
	AL	52.45±0.33 a	21.16±0.27 a	27.39±0.14 a	99.09±0.12 a	7.37±0.82 b
	AC	53.46±0.45 a	21.23±0.62 a	25.31±1.07 a	98.85±0.06 a	11.20±0.60 a
P 值 *P*-value						
处理 Treatment (T)		0.000	0.424	0.015	0.060	0.000
年份 Year (Y)		0.145	0.007	0.033	0.043	0.102
处理×年份 T×Y		0.923	0.920	0.922	0.896	0.376

数据为平均值±标准误, 同列标以不同字母的值在 0.05 水平上差异显著。GSSI 和 STPSD 分别代表广义土壤结构指数和土壤三相结构距离。处理缩写同表 1。

Data is mean ± SE. Values followed by a different letter within a column are significantly different among treatments at $P \leq 0.05$. GSSI and STPSD represent generalized soil structure index, soil three-phase structure distance respectively. Abbreviations are the same as those described in Table 1.

春玉米收获后耕层构造对土壤三相比影响显著(P<0.05)(表 3), 2015 年 0~10 cm 土层固相 AC 与 FLRC、AL、CK 差异显著(P<0.05), 液相 AL 与 CK 差异显著(P<0.05), 气相 AC 与 FLRC、CK 差异显著(P<0.05); GSSI 指标 AL 比 CK 高 5.30%, 差异显著(P<0.05); STPSD 指标 FLRC、AL 分别比 CK 低 15.42%、20.04%, 差异显著(P<0.05), , 该层虚实并存和全虚耕层构造土壤结构最接近理想状态。10~20 cm 土层固相、液相、气相、GSSI 指标、GSSI 指标均差异不显著(P>0.05)。20~30 cm 土层固相 FLRC、AL 与 CK 差异显著(P<0.05), 液相、气相、GSSI 指标、STPSD 指标均差异不显著(P>0.05)。2016 年 0~10 cm 土层固相 AC 与 CK、FLRC、AL 差异显著(P<0.05), 液相、气相、GSSI 指标均差异不显著(P>0.05), FLRC 与 CK、AC 差异显著(P<0.05), 该层虚实并存耕层构造土壤结构最接近理想状态。10~20 cm 土层固相、液相、气相、GSSI 指标、STPSD 指标均差异不显著(P>0.05)。20~30 cm 土层固相 AC 与 FLRC、AL 差异显著(P<0.05); 固相 FLRC 与 AC 差异显著(P<0.05); 气相和 GSSI 指标差异不显著(P>0.05); STPSD 指标 FLRC、AL 分别比 CK 低 8.90%、6.90%, 差异显著(P<0.05), 该层以虚实并存和全虚耕层构造土壤结构最接近理想状态。由此表明, 无论是干旱年份还是丰水年份春玉米收获后 20~30 cm 土层虚实并存和全虚耕层构造土壤三相比优于上虚下实耕层和全实耕层构造。

表 3　春玉米收获后耕层构造对土壤三相比的影响
Table 3　Effect of plough layer constructions on three-phase ratio of soil in maize harvest

土层 Soil layer (cm)	处理 Treatment	固相 Solid phase (%)	液相 Liquid phase (%)	气相 Gas phase (%)	GSSI	STPSD
2015						
0–10	CK	51.82±0.33 b	11.98±0.50 b	36.20±0.81 a	86.79±1.29 b	14.92±0.20 a
	FLRC	50.31±0.55 c	12.75±0.56 ab	36.93±0.98 a	87.80±1.37 ab	12.62±0.53 b
	AL	51.07±0.33 bc	14.40±0.60 a	34.53±0.91 ab	91.39±1.14 a	11.93±0.23 b
	AC	53.46±0.33 a	13.52±0.38 ab	33.02±0.18 b	90.57±0.67 ab	15.56±0.68 a
10–20	CK	55.72±0.67 a	16.33±0.76 a	27.95±1.42 a	94.74±0.68 a	16.91±0.59 a
	FLRC	54.34±0.44 a	15.10±0.47 a	30.56±0.81 a	93.32±0.75 a	15.65±0.47 a
	AL	55.47±0.22 a	16.96±0.74 a	27.56±0.59 a	95.60±0.75 a	16.18±0.64 a
	AC	54.97±0.33 a	16.66±0.46 a	28.37±0.79 a	95.37±0.51 a	15.61±0.23 a
20–30	CK	56.98±0.44 a	19.86±0.23 a	23.16±0.34 a	97.14±0.29 a	17.27±0.71 a
	FLRC	55.60±0.13 c	18.96±1.64 a	25.44±1.74 a	96.77±1.03 a	15.62±0.50 a
	AL	55.72±0.45 bc	20.17±0.28 a	24.11±0.19 a	97.87±0.30 a	15.22±0.80 a
	AC	56.86±0.33 ab	19.71±0.48 a	23.43±0.15 a	97.15±0.34 a	17.13±0.66 a
2016						
0–10	CK	52.96±0.33 b	18.89±0.15 a	28.15±0.21 a	97.66±0.13 a	11.33±0.61 b
	FLRC	51.45±0.55 c	20.02±0.15 a	28.53±0.62 a	98.37±0.16 a	8.03±1.00 c
	AL	52.20±0.33 bc	19.49±0.76 a	28.31±1.06 a	97.96±0.52 a	9.82±0.32 bc
	AC	54.59±0.33 a	18.45±0.55 a	26.96±0.26 a	97.15±0.46 a	14.13±0.76 a
10–20	CK	56.10±0.25 a	21.77±0.38 a	22.13±0.57 a	97.98±0.16 a	15.42±0.36 a
	FLRC	55.35±0.45 a	23.20±0.58 a	21.45±0.31 a	98.36±0.22 a	13.94±0.81 a
	AL	55.72±0.33 a	22.47±0.89 a	21.80±1.03 a	98.07±0.24 a	14.71±0.52 a
	AC	56.10±0.33 a	21.22±0.23 a	22.68±0.19 a	97.96±0.21 a	15.53±0.58 a
20–30	CK	57.61±0.25 ab	25.66±0.70 ab	16.73±0.78 a	94.78±0.72 a	17.53±0.19 a
	FLRC	56.60±0.22 b	26.59±0.30 a	16.81±0.14 a	95.29±0.12 a	15.97±0.33 b
	AL	56.86±0.45 b	25.30±0.74 ab	17.84±1.00 a	95.95±0.81 a	16.32±0.71 b
	AC	57.99±0.33 a	23.95±0.65 b	18.06±0.95 a	95.61±0.80 a	18.14±0.50 a
P 值 *P*-value						
处理 Treatment (T)		0.095	0.808	0.893	0.528	0.009
年份 Year (Y)		0.071	0.000	0.000	0.000	0.046
处理×年份 T×Y		0.991	0.429	0.801	0.585	0.670

数据为平均值±标准误, 同列标以不同字母的值在 0.05 水平上差异显著。GSSI 和 STPSD 分别代表广义土壤结构指数和土壤三相结构距离。处理缩写同表 1。

Data is mean± SE. Values followed by a different letter within a column are significantly different among treatments at $P \le 0.05$. GSSI and STPSD represent generalized soil structure index, soil three-phase structure distance respectively. Abbreviations are the same as those described in Table 1.

2.4　耕层构造对春玉米根系形态的影响

2.4.1　根重密度　　耕层构造对春玉米根重密度影响显著(P<0.05)(图 3), 2015 年 0~10 cm 根重密度 AC、FLRC、AL 分别比 CK 增加 64.32%、38.11%、9.33%, 差异显著(P<0.05); 10~20 cm 根重密度 FLRC、AL、AC 分别比 CK 增加 97.09%、46.24%、26.87%, 差异显著(P<0.05); 20~30 cm 根重密度 AL 比 CK 增加 10.22%, 差异显著(P<0.05); 40~50 cm 根重密度 FLRC、AC、AL 分别比 CK 增加 50.98%、47.59%、23.08%, 差异显著(P<0.05); 50~100 cm 根重密度各处理间一直保持着这种差异性。2016 年根重密度表现不同, 0~10 cm 根重密度 FLRC、AL 分别比 CK 增加 80.34%、7.47%, 差异显著(P<0.05); 10~20 cm 根重密度 FLRC 比 CK 增加 75.84%, 差异显著(P<0.05); 20~30 cm 根重密度 AL 比 CK 增加 11.93%, 差异显著(P<0.05); 40~50 cm 根重密度差异

不显著(P>0.05), 50~60 cm 根重密度 AL、AC 与 CK 差异显著(P<0.05); 60~70 cm 根重密度各处理间一直保持着这种差异性。说明干旱年份全实耕层和虚实并存耕层构造能够增加春玉米根重密度; 丰水年份虚实并存耕层构造和全虚耕层构造能够增加春玉米根重密度, 增幅 7.47%~97.09%。

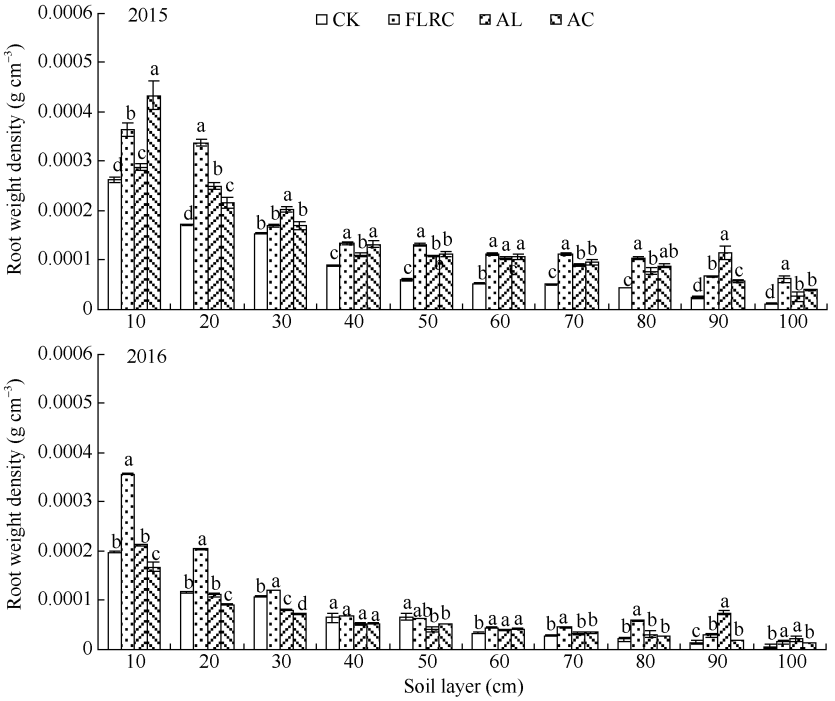


图 3 耕层构造对春玉米根重密度的影响

Fig. 3 Effect of plough layer constructions on maize root weight density

标以不同字母的柱值在 P < 0.05 水平上差异显著。处理缩写同表 1。

Bars labelled with different letters are significantly different at P < 0.05. Abbreviations are the same as those described in Table 1.

2.4.2 根长密度 耕层构造对春玉米根长密度影响显著(P<0.05)(图 4), 2015 年 0~10 cm 根长密度 AC、FLRC、AL 分别比 CK 增加 112.04%、65.35%、6.62%, 差异显著(P<0.05); 10~20 cm 根长密度 FLRC、AL、AC 分别比 CK 增加 57.24%、50.51%、30.25%, 差异显著(P<0.05); 20~30 cm 根长密度 AL 比 CK 增加 35.97%, 差异显著(P<0.05); 40~50 cm 根长密度 FLRC、AC、AL 分别比 CK 增加 41.18%、37.67%、12.24%, 差异显著(P<0.05); 50~100 cm 根重密度各处理间一直保持着这种差异性。2016 年根长密度表现不同, 0~10 cm 根长密度 FLRC、AC、AL 分别比 CK 增加 50.04%、37.60%、23.72%, 差异显著(P<0.05); 10~20 cm 根长密度 FLRC 比 CK 增加 14.23%, 差异显著(P<0.05); 20~30 cm 根长密度 AL、AC 与 CK 差异显著(P<0.05), 但均低于 CK; 30~40 cm 根长密度与 20~30 cm 表现一致; 50~80 cm 根长密度 FLRC 和 CK 差异显著(P<0.05), 80~100 cm 根长密度差异不显著(P>0.05)。说明干旱年份全实耕层和虚实并存耕层构造能够增加春玉米根长密度; 丰水年份虚实并存耕层构造能够增加春玉米根长密度, 增幅 6.62%~112.04%。

2.4.3 根表面积密度 耕层构造对春玉米根表面积密度影响显著(P<0.05)(图 5), 2015 年 0~10 cm 根表面积密度 AC、FLRC 分别比 CK 增加 125.07%、63.49%, 差异显著(P<0.05); 10~20 cm 根表面积密度 FLRC、AC、AL 分别比 CK 增加 49.70%、25.93%、13.36%, 差异显著(P<0.05); 20~30 cm 根表面积密度 AC 比 CK 增加 38.66%, 差异显著(P<0.05); 40~50 cm 根表面积密度 FLRC、AC、AL 分别比 CK 增加 124.01%、71.77%、30.32%, 差异显著(P<0.05); 50~100 cm 根表面积密度各处理间一直保持着这种差异性。2016 年根表面积密度表现不同, 0~10 cm 根表面积密度 FLRC、AL 分别比 CK 增加 15.03%、9.80%, 差异显著(P<0.05); 10~20 cm 根表面积密度 FLRC 比 CK 增加 44.29%, 差异显著(P<0.05); 20~30 cm 根表面积密度 FLRC 比 CK 增加 38.72%, 差异显著(P<0.05); 40~100 cm 根表面积密度 FLRC 和 CK 差异不显著(P>0.05)。说明干旱年份全实耕层

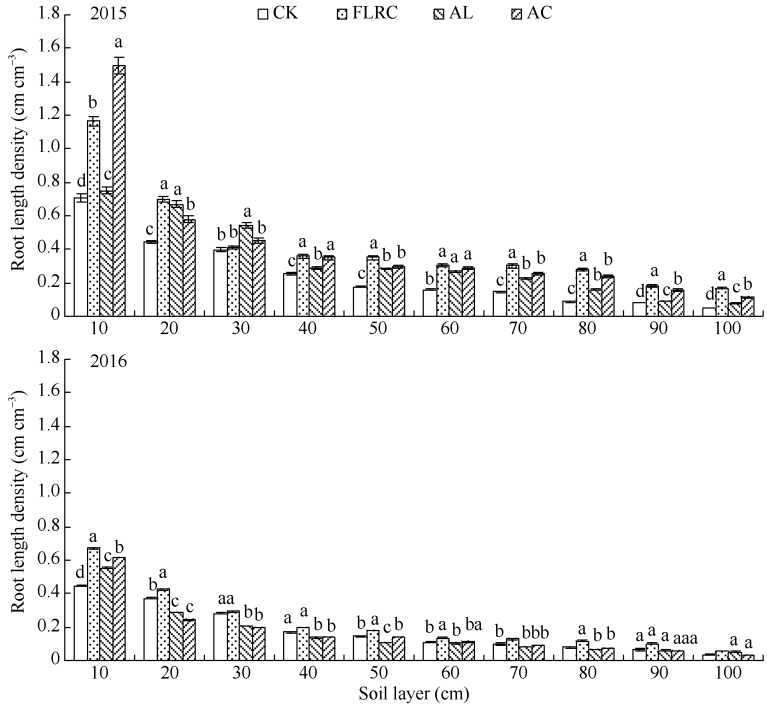


图 4　耕层构造对春玉米根长密度的影响

Fig. 4　Effect of plough layer constructions on maize root length density

标以不同字母的柱值在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。处理缩写同表 1。

Bars labelled with different letters are significantly different at $P < 0.05$. Abbreviations are the same as those described in Table 1.

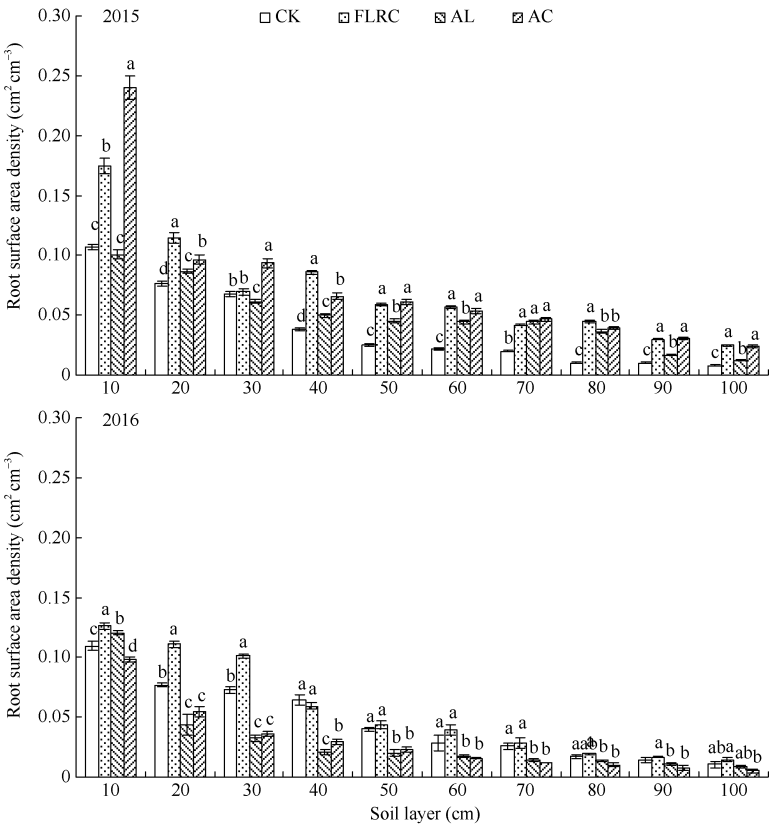


图 5　耕层构造对春玉米根表面积密度的影响

Fig. 5　Effect of plough layer constructions on maize root surface area density

标以不同字母的柱值在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。处理缩写同表 1。

Bars labelled d with different letters are significantly different at $P < 0.05$. Abbreviations are the same as those described in Table 1.

和虚实并存耕层构造能够增加春玉米根表面积密度; 丰水年份虚实并存耕层构造能够增加春玉米根表面积密度, 增幅 9.80%~125.07%。

2.4.4 根体积密度 耕层构造对春玉米根体积密度影响显著(P<0.05)(图 6), 2015 年 0~10 cm 根体积密度 AC、FLRC 分别比 CK 增加 125.92%、53.35%, 差异显著(P<0.05); 10~20 cm 根体积密度 AC、FLRC 分别比 CK 增加 47.04%、43.56%, 差异显著(P<0.05); 20~30 cm 根体积密度 AC 比 CK 增加 29.97%, 差异显著(P<0.05); 40~50 cm 根体积密度 AC、AL、FLRC 分别比 CK 增加 151.97%、97.10%、83.55%, 差异显著(P<0.05); 50~100 cm 根体积密度各处理间一直保持着这种差异性。2016 年根体积密度表现不同, 0~10 cm 根体积密度 AC 比 CK 增加 35.55%, 差异显著(P<0.05); 10~20 cm 根体积密度 AC、FLRC 分别比 CK 增加 86.74%、76.76%, 差异显著(P<0.05); 20~30 cm 根体积密度 FLRC、AC、AL 分别比 CK 增加 97.06%、69.71%、63.67%, 差异显著(P<0.05); 40~50 cm 根体积密度 AL、FLRC 分别比 CK 增加 42.11%、40.11%, 差异显著(P<0.05); 60~100 cm 根体积密度差异不显著(P>0.05), 说明干旱年份全实耕层和虚实并存耕层构造能够增加春玉米根体积密度, 增幅 40.11%~151.97%; 丰水年份虚实并存耕层构造和全虚耕层构造能够增加春玉米根体积密度, 且随着降雨量增加, 对深层根体积密度影响越小。

3 讨论

3.1 耕层构造与作物产量

多数研究已经证实适宜耕层构造能够促进作物生长并增产, 冯倩倩等[29]研究表明, 虚实并存耕层构造能增加作物有效穗数、穗粒数、千粒重等产量构成因素, 进而增加籽粒产量; 全实耕层构造显著降低穗粒数和千粒重, 不利于作物增产; 刘武仁等[30]研究表明, 虚实并存耕层构造比上虚下实耕层构造和全虚耕层构造分别增产 20.06%和 4.08%; 不同耕层构造方式对春玉米籽粒产量和群体生物产量的影响与作物生育期降雨的数量与分布息息相关, 在不同年份表现不同[3]。本研究表明, 不同耕层构造

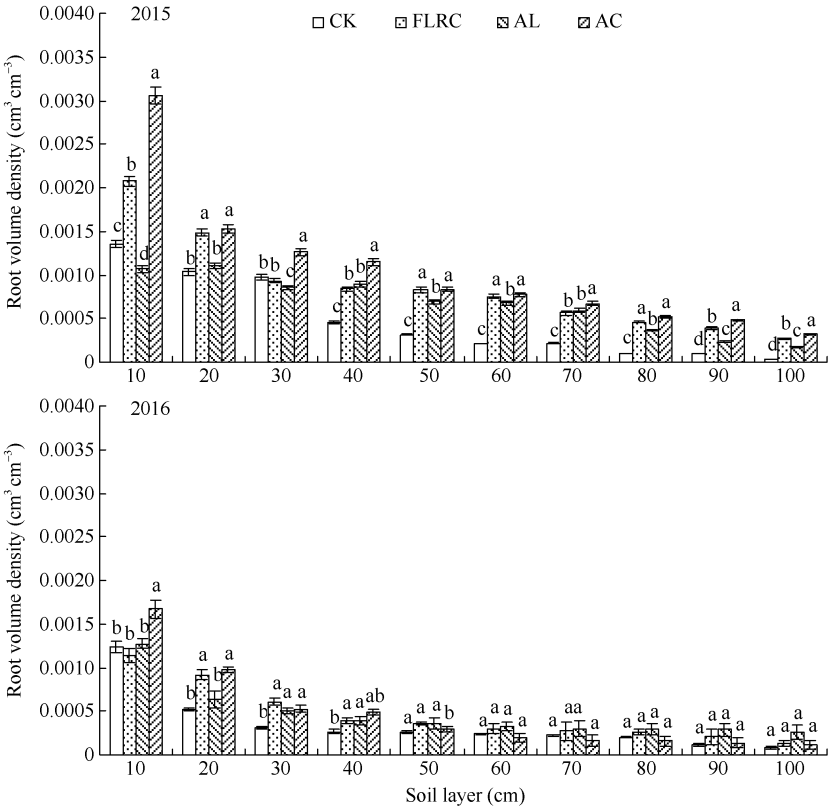


图 6 耕层构造对春玉米根体积密度的影响

Fig. 6 Effect of plough layer constructions on maize root volume density

标以不同字母的柱值在 P < 0.05 水平上差异显著。处理缩写同表 1。

Bars labelled with different letters are significantly different at P < 0.05. Abbreviations are the same as those described in Table 1.

对春玉米籽粒产量、群体生物产量和收获指数影响显著(P<0.05), 虚实并存耕层和全实耕层构造能够增加春玉米产量, 产量增幅 18.19%~34.86%, 主要原因是行粒数显著提高和秃尖降低。虚实并存耕层构造能提高春玉米群体生物产量, 增幅 5.18%~11.30%; 丰水年份虚实并存耕层构造和全虚耕层构造能够提高春玉米收获指数, 干旱年份全实耕层构造能够提高春玉米收获指数。

3.2 耕层构造与土壤三相比

耕层构造直接影响土壤物理指标变化, 多数研究认为不同耕层构造能够改变土壤固、液、气三相的分配。李晓龙等[28]研究表明, 虚实并存耕层比上虚下实耕层具有较大的 GSSI 值和较小的 STPSD 值, 耕层土壤结构更加接近理想状态, 可以有效地改善土壤物理结构, 特别是 20~40 cm 土层的 GSSI 和 STPSD 均显著优于对照; 赵亚丽等[31]研究表明, 虚实并存耕层构造显著降低了土壤紧实度和土壤三相比 R 值, 比上虚下实耕层构造土壤紧实度降低 20.9%, 土壤三相比 R 值降低 12.9%。本研究表明, 春玉米播种前耕层构造对土壤三相比影响显著(P<0.05), 无论是干旱年份还是丰水年份 0~10 cm 土壤三相比均以全实耕层构造为宜, 10~30 cm 土壤三相比以虚实并存和全虚耕层构造为宜; 春玉米收获后耕层构造对土壤三相比影响显著(P<0.05), 无论是干旱年份还是丰水年份春玉米收获后 20~30 cm 土层虚实并存和全虚耕层构造的土壤三相比优于上虚下实耕层构造。

3.3 耕层构造与作物根系

土壤与作物的动态联系主要集中在作物根系[32], 耕层结构改变将直接影响作物根系形态指标变化, 多数研究认为耕层构造可以影响作物根系形态指标。赵亚丽等[31]研究表明, 虚实并存耕层构造比上虚下实耕层构造玉米根长、根系表面积、根系体积、根系干重密度分别增加 67.0%、45.3%、23.1%、49.5%; 高飞等[33]研究表明, 虚实并存耕层比对照 0~30 cm 的根干重、根长、根表面积、根体积分别提高 59.1%、22.8%、41.1%、59.2%。本研究结果表明, 干旱年份全实耕层和虚实并存耕层构造能够增加春玉米根重密度、根长密度、根表面积密度和根体积密度; 其中春玉米根重密度增幅 7.47%~97.09%, 根长密度增幅 6.62%~112.04%, 根表面积密度增幅 9.80%~125.07%, 根体积密度增幅 40.11%~151.97%, 但增幅与前人研究结果略有不同, 主要是耕作方式、降雨量、生态环境等因素的不同所致。

4 结论

干旱年和丰水年虚实并存耕层构造和全实耕层构造均能增加春玉米产量, 丰水年产量增幅为 18.19%~34.86%, 主要原因是行粒数显著提高和秃尖降低。无论干旱年份还是丰水年份虚实并存耕层构造均能提高春玉米群体生物产量。虚实并存耕层能够优化土壤三相比, 无论是干旱年份还是丰水年份 0~10 cm 土壤三相比均以全实耕层构造为宜, 10~30 cm 土壤三相比以虚实并存和全虚耕层构造为宜; 春玉米收获后 20~30 cm 土层虚实并存构造和全虚耕层构造优于上虚下实耕层构造。虚实并存耕层和全虚耕层构造能够增加春玉米吐丝期根重密度、根长密度、根表面积密度和根体积密度。相对于传统旋耕耕作构建的上虚下实耕层结构, 虚实并存耕层能优化土壤三相比, 促进作物根系生长, 增加作物产量, 是辽西旱作农业区比较理想的合理耕层构造方式。

References

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2008–2010. pp 204–209.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistics Year Book. Beijing: China Statistics Press, 2008–2010. pp 204–209 (in Chinese).

[2] 白伟, 孙占祥, 郑家明, 侯志研, 刘洋, 冯良山, 杨宁. 辽西地区不同种植模式对春玉米产量形成及其生长发育特性的影响. 作物学报, 2014, 40: 181–189.
Bai W, Sun Z X, Zheng J M, Hou Z Y, Liu Y, Feng L S, Yang N. Effect of different planting patterns on maize growth and yield in western Liaoning province. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 181–189 (in Chinese with English abstract).

[3] 白伟, 孙占祥, 郑家明, 郝卫平, 刘勤, 刘洋, 蔡倩. 虚实并存耕层提高春玉米产量和水分利用效率. 农业工程学报, 2014, 30(21): 81–90.
Bai W, Sun Z X, Zheng J M, Hao W P, Liu Q, Liu Y, Cai Q. Furrow loose and ridge compaction plough layer improve spring maize yield and water use efficiency in dry-land. *Trans CSAE*, 2014, 30(21): 81–90 (in Chinese with English abstract).

[4] 王立春, 马虹, 郑金玉. 东北春玉米耕地合理耕层构造研究. 玉米科学, 2008, 16(4): 13–17.
Wang L C, Ma H, Zheng J Y. Research on rational plough layer construction of spring maize soil in northeast China. *J Maize Sci*, 2008, 16(4): 13–17 (in Chinese with English abstract).

[5] 聂良鹏, 郭利伟, 牛海燕, 魏杰, 李增嘉, 宁堂原. 轮耕对小麦-玉米两熟农田耕层构造及作物产量与品质的影响. 作物学报, 2015, 41: 468–478.
Nie L P, Guo L W, Niu H Y, Wei J, Li Z J, Ning T Y. Effects of rotational tillage on tilth soil structure and crop yield and quality

in maize–wheat cropping system. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 468–478 (in Chinese with English abstract).

[6] 郑洪兵, 郑金玉, 罗洋, 李瑞平, 王浩, 李伟堂, 齐华. 农田不同耕层构造对玉米生长发育及产量的影响. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 41–45.
Zheng H B, Zheng J Y, Luo Y, Li R P, Wang H, Li W T, Qi H. Effects of different tillage layer structures on growth and yield of maize in cropland zone in northeast of China. *Agric Res Arid Areas*, 2015, 33(5): 41–45 (in Chinese with English abstract).

[7] 韩晓增, 邹文秀, 王凤仙, 王凤菊. 黑土肥沃耕层构建效应. 应用生态学报, 2009, 20: 2996–3002.
Han X Z, Zou W X, Wang F X, Wang F J. Construction effect of fertile cultivated layer in black soil. *Chin J Appl Ecol*, 2009, 20: 2996–3002 (in Chinese with English abstract).

[8] Bai W, Sun Z X, Zheng J M, Liu Y, Hou Z Y, Feng L S, Zhang Z. The combination of subsoil and the incorporation of corn stover affect physicochemical properties of soil and corn yield in semi-arid China. *Toxicol Environ Chem*, 2016, 98: 561–570.

[9] Moitzi G, Amon S, Klik A, Schwen A. Effect of two-axle and three-axle sugarbeet tanker harvester on selected soil-physical properties in dry and wet soil conditions. *CIGR J*, 2019, 21: 18–27.

[10] Ren L, Nest T V, Ruysschaert G, D'Hose T, Cornelis W M. Short-term effects of cover crops and tillage methods on soil physical properties and maize growth in a sandy loam soil. *Soil Tillage Res*, 2019, 192: 76–86.

[11] 白伟, 安景文, 张立祯, 逄焕成, 孙占祥, 牛世伟, 蔡倩. 秸秆还田配施氮肥改善土壤理化性状提高春玉米产量. 农业工程学报, 2017, 33(15): 168–176.
Bai W, An J W, Zhang L Z, Pang H C, Sun Z X, Niu S W, Cai Q. Improving of soil physical and chemical properties and increasing spring maize yield by straw turnover plus nitrogen fertilizer. *Trans CSAE*, 2017, 33(15): 168–176 (in Chinese with English abstract).

[12] Munkholm L J, Heck R J, Deen B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil Tillage Res*, 2013, 127: 85–91.

[13] Sun M, Ren A X, Gao Z Q, Wang P R, Mo F, Xue, L Z, Lei M M. Long-term evaluation of tillage methods in fallow season for soil water storage, wheat yield and water use efficiency in semiarid southeast of the Loess Plateau. *Field Crops Res*, 2018, 218: 24–32.

[14] Jakhar P, Rana K S, Dass A, Choudhary A K, Kumar P R A M O D, Meena M C, Choudhary M U K E S H. Tillage and residue retention effect on crop and water productivity of Indian mustard (*Brassica juncea*) under rainfed conditions. *Indian J Agric Sci*, 2018, 88: 47–53.

[15] Kaur R, Arora V K. Deep tillage and residue mulch effects on productivity and water and nitrogen economy of spring maize in north-west India. *Agric Water Manage*, 2019, 213: 724–731.

[16] Salem H M, Valero C, Muñoz M Á, Rodríguez M G, Silva L L. Short-term effects of four tillage practices on soil physical properties, soil water potential, and maize yield. *Geoderma*, 2015, 237: 60–70.

[17] Weyers S L, Archer D W, Forcella F, Gesch R, Johnson J M. Strip-tillage reduces productivity in organically managed grain and forage cropping systems in the Upper Midwest, USA. *Renewable Agric Food Syst*, 2018, 33: 309–321.

[18] Glinski J. Soil Physical Conditions and Plant Roots. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2018. pp 24–62.

[19] De Moraes M T, Bengough A G, Debiasi H, Franchini J C, Levien R, Schnepf A, Leitner D. Mechanistic framework to link root growth models with weather and soil physical properties, including example applications to soybean growth in Brazil. *Plant Soil*, 2018, 428: 67–92.

[20] Blanco-Canqui H, Ruis S J. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 2018, 326: 164–200.

[21] Logan T J. Effects Conservation Tillage on Ground Water Quality: Nitrates and Pesticides. Boca Raton, London-New York: CRC Press, 2018. pp 62–75.

[22] Dang Y P, Moody P W, Bell M J, Seymour N P, Dalal R C, Freebairn D M, Walker S R. Strategic tillage in no-till farming systems in Australia's northern grains-growing regions: II. Implications for agronomy, soil and environment. *Soil Tillage Res*, 2015, 152: 115–123.

[23] Li H, Mollier A, Ziadi N, Shi Y, Parent L É, Morel C. The long-term effects of tillage practice and phosphorus fertilization on the distribution and morphology of corn root. *Plant Soil*, 2017, 412: 97–114.

[24] He Y B, Lin L R, Chen J Z. Maize root morphology responses to soil penetration resistance related to tillage and drought in a clayey soil. *J Agric Sci*, 2017, 155: 1137–1149.

[25] Hou R X, Zhu O Y, Han D R, Wilson G V. Effects of field experimental warming on wheat root distribution under conventional tillage and no-tillage systems. *Ecol Evol*, 2018, 8: 2418–2427.

[26] Guan D, Zhang Y, Al-Kaisi M M, Wang Q, Zhang M, Li Z. Tillage practices effect on root distribution and water use efficiency of winter wheat under rain-fed condition in the North China Plain. *Soil Tillage Res*, 2015, 146: 286–295.

[27] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000. pp 25–114.
Bao S D. Soil Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000. pp 25–114 (in Chinese).

[28] 李晓龙, 高聚林, 胡树平, 于晓芳, 王志刚, 苏治军, 谢岷. 不同深耕方式对土壤三相比及玉米根系构型的影响. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 1–7.
Li X L, Gao J L, Hu S P, Yu X F, Wang Z G, Su Z J, Xie M. Effects of various cultivation approaches on the three-phase ratio of soil and root system structure of maize. *Agric Res Arid Areas*, 2015, 33(4): 1–7 (in Chinese with English abstract).

[29] 冯倩倩, 韩惠芳, 张亚运, 许菁, 曹亚倩, 王少博, 李增嘉. 耕作方式对麦–玉轮作农田固碳、保水性能及产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2018, 24: 869–879.
Feng Q Q, Han H F, Zhang Y Y, Xu J, Cao Y Q, Wang S B, Li Z J. Effects of tillage methods on soil carbon sequestration and water holding capacity and yield in wheat–maize rotation. *J Plant Nutr Fert*, 2018, 24: 869–879 (in Chinese with English abstract).

[30] 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 郑洪兵, 李瑞平, 李伟堂. 不同耕层构造对玉米生长发育及产量的影响. 吉林农业科学, 2013, 38(5): 1–3.

Liu W R, Zheng J Y, Luo Y, Zheng H B, Li R P, Li W T. Effects of structures of different tillage layer on growth and yield of maize. *J Jilin Agric Sci,* 2013, 38(5): 1–3 (in Chinese with English abstract).

[31] 赵亚丽, 刘卫玲, 程思贤, 周亚男, 周金龙, 王秀玲, 李潮海. 深松(耕)方式对砂姜黑土耕层特性,作物产量和水分利用效率的影响. 中国农业科学, 2018, 51: 2489–2503.
Zhao Y L, Liu W L, Cheng S X, Zhou Y N, Zhou J L, Wang X L, Li C H. Effects of pattern of deep tillage on topsoil features, yield and water use efficiency in lime concretion black soil. *Sci Agric Sin*, 2018, 51: 2489–2503 (in Chinese with English abstract).

[32] 梁泉, 廖红, 严小龙. 植物根构型的定量分析. 植物学通报, 2007, 24: 695–702.
Liang Q, Liao H, Yan X L. Quantitative analysis of plant root architecture. *Chin Bull Bot*, 2007, 24: 695–702 (in Chinese with English abstract).

[33] 高飞, 李霞, 任佰朝, 董树亭, 刘鹏, 赵斌, 张吉旺. 小麦玉米周年生产中耕作方式对夏玉米根系特性和产量的影响. 中国农业科学, 2017, 50: 2141–2149.
Gao F, Li X, Ren B Z, Dong S T, Liu P, Zhao B, Zhang J W. Root characteristics and grain yield of summer maize under different winter wheat-summer maize tillage systems. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 2141–2149 (in Chinese with English abstract).