

麦前深松对夏玉米土壤物理性状和生长特性的影响

王万宁^{1,2}, 强小嫚¹, 刘浩¹, 孙景生¹, 马筱建^{1,2}, 崔永生^{1,2}

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所/农业部作物需水过程与调控重点实验室, 河南 新乡 453002;

2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081)

摘要: 为探明华北地区深松耕作方式对夏玉米生育期土壤物理性状和水分利用效率的影响, 在河南省新乡采用冬小麦播前深松耕作(PS)、传统旋耕(CK)2种耕作方式, 对夏玉米各生育期间的土壤粒径组成、容重、土壤紧实度、夏玉米生长发育指标及水分利用效率等进行了研究。结果表明: PS处理下土壤粒径组成无明显变化, 全生育期 PS较CK处理 0—40 cm 土层土壤容重降低 0.63%~3.85%, 孔隙度提高 0.27%~3.67%; 拔节期 PS较CK处理 20—30, 30—40 cm 土层土壤紧实度显著降低 37.76%, 22.26%; 全生育期 PS处理的土壤含水率、夏玉米株高、叶面积指数、干物质积累量均高于CK, 产量提高了 9.50%, 穗长和穗粒重提高了 4.18%和 6.50% ($p < 0.05$), 水分利用效率提高 5.08%, 节水增产效果显著。

关键词: 深松; 土壤容重; 土壤紧实度; 干物质; 水分利用效率

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)06-0229-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.06.036

Effects of Subsoiling Before Sowing of Winter Wheat on Soil Physical Properties and Growth Characteristics of Summer Maize

WANG Wanning^{1,2}, QIANG Xiaoman¹, LIU Hao¹,

SUN Jingsheng¹, MA Xiaojian^{1,2}, CUI Yongsheng^{1,2}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Ministry of

Agriculture Key Laboratory of Crop Water Requirement and Regulation, Xinxiang,

Henan 453002; 2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Subsoiling before sowing (PS) is beneficial to improve soil structure and permeable capacity. To explore the effect of PS of winter wheat on soil physical properties and water use efficiency of summer maize, field experiment was carried out with traditional rotary tillage as CK. In the study, the soil particle size composition, bulk density, soil compaction, growth index and water use efficiency were observed during summer maize growing stage in north china plain. The results showed that there was no significant difference in soil particle size between PS treatment and CK. During the whole growth period, the soil bulk density of PS decreased by 0.63%~3.85% while the porosity was increased by 0.27%~3.67% compared to CK in 0—40 cm soil layer; Soil compaction of PS was significantly decreased by 37.76% (at 20—30 cm) and 22.26% (at 30—40 cm) compared to CK at jointing stage. In the whole growth period, soil water storage capacity, plant height, leaf area index and dry matter accumulation were all higher than CK. Specifically, the yield was significantly increased by 9.50%, the spike length and grain weight per panicle were increased by 4.18% and 6.50% ($p < 0.05$), respectively, and the water use efficiency was increased by 5.08%. Effects of the water saving and yield increasing were significant under PS treatment.

Keywords: subsoiling; soil bulk density; soil compaction; dry matter; water use efficiency

华北地区是冬小麦—夏玉米一年两熟作物主产区, 该区长期采用传统的冬小麦播前旋耕、夏玉米免耕播种的耕作模式, 导致土壤耕层逐年变浅、犁底层

逐渐变硬、变厚^[1], 耕层质量日趋下降, 降低了土壤蓄水保肥能力和作物抵御自然灾害能力, 严重影响了作物生长发育, 已成为制约大面积粮食作物稳产高产的

收稿日期: 2017-06-03

资助项目: 国家公益性行业(农业)科技专项(201503117); 中国农业科学院基本科研业务费专项(FIRI 2016-08); 河南省科技攻关计划项目(162102110017)

第一作者: 王万宁(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事作物水分高效利用技术研究。E-mail: wangwanning1234@163.com

通信作者: 孙景生(1963—), 男, 博士生导师, 研究员, 主要从事作物水分生理及高效用水技术研究。E-mail: jshsun623@163.com

主要障碍因素^[2-4];另一方面,随着农业机械化日益成熟,播种和收获时农机重量也加剧了底土压实的风险,土壤功能进一步受到影响^[5]。因此,打破犁底层、改善土壤耕层结构、提高土壤肥力和蓄水保墒能力的深松耕作技术日趋受到人们的广泛重视。

为了探究深松耕作对农田土壤物理性质和作物生长发育的影响,以便有针对性地提出合理耕层构建指标和技术,许多学者开展了相应的研究工作,结果表明:深松耕作能够打破犁底层,改善土壤结构和通透性,有利于降水和灌溉水的入渗,减少径流,提高了降水资源利用率、作物水分利用效率和土壤有机质含量,改善了土壤透气性与三相比,有利于作物根系生长发育^[6-7];黄健等^[8]研究发现,与传统耕作相比,深松可使 0—50 cm 土层土壤容重平均降低 0.14 g/cm³,土壤孔隙度增加 10%~20%;Jabro 等^[9]研究发现,深松较浅耕相比能够提高土壤孔隙度,提高土壤含水率,并在 0—20 cm 深度显著提高了土壤饱和导水率,增加土壤水摄入,改善土壤通气状况,增加了氮的吸收利用;郭家萌等^[10]研究表明,深松较传统耕作增产的同时也促进了植株地上部吸氮量和吸磷量,增加了 0—25 cm 土层有效磷含量;Botta 等^[11]研究发现,密实的底土层影响向日葵苗根系生长及其产量,深松耕作 2 年后深松效果明显减弱,30—60 cm 土层土壤回实紧实度逐步增大;Alamouti 等^[12]研究发现,深松(深度约 32 cm)对土壤密度、土壤有机碳、入渗速率和作物产量的影响最大,增加耕作深度有利于土壤有机碳和产量的提高;Liu 等^[13]研究发现,长期传统耕作压实了底土层并引起容重值偏大,对作物生长以及土壤水分分布有一定影响,深松后亏缺灌溉条件下更易获得高产;张洁等^[14]研究表明,深松覆盖较传统耕作土壤有机碳增加 13.83%,0—20 cm 土层土壤的微生物量碳、氮较传统耕作增加了 17.92%和 8.13%;Xu 等^[15]研究发现,与传统耕作相比,免耕、深松耕作方式促进土壤渗透和深层渗漏,从而有利于地下水补给;孔晓民等^[16]研究发现,0—35 cm 耕层土壤容重较常规旋耕和免耕分别下降 6.5%和 8.8%,土壤紧实度分别下降 25.6%和 32.3%;张瑞富等^[17]研究发现,深松能促进春玉米根系生长,提高根系活力,延缓根系衰老,有利于籽粒灌浆和产量的形成;Mu 等^[18]研究发现,增加耕作深度对华北地区小麦玉米轮作区产量分别增加 6.0%和 8.7%,降低了土壤容重并提高土壤水分入渗且增加土壤含水率,创造出适宜的土壤环境并改善了农业灌溉生产条件;秦红灵等^[19]研究发现,土壤免耕第 3 年的基础上深松 40 cm,莜麦

作物生育期 0—100 cm 土壤贮水量显著高于对照,促进了根系对 50—100 cm 土层土壤水分的消耗,两年平均产量较对照增加 18.29%,水分利用效率提高 9.68%;DiAz-Zorita 等^[20]研究发现,深松免耕能促进玉米植株的营养生长,但对籽粒和产量影响无显著差异;郭静等^[21]研究发现,2/3 秸秆量还田结合深耕处理对作物苗期光合参数、叶面积指数较免耕和旋耕有显著提高;刘战东等^[22]在我国多地的试验研究结果表明,与传统旋耕 15 cm 的对照相比,秋季深松 30 cm,玉米田耕层土壤体质量降低,主根层和深层土壤储水增加,玉米产量和水分利用效率均有显著提高;许迪等^[23]研究表明,深松耕作明显减小了耕层土壤干容重、增加孔隙度,土壤空隙尺度分布状况的改善使得土壤饱和时土壤的水分传导性能得以提高,耕作方式引起耕层土壤特性变化在夏玉米生育期内呈现较强的时间变异性;也有研究表明,3 年深松的土壤平均容重较少耕和免耕分别降低 7.3%和 5.7%,全年无显著差异,3 种耕作方式对 0—40 cm 土层导水率和含水率无显著影响,可能是受土壤异质性或土壤质地的影响,耕作方式对土壤容重、土壤含水率和产量的影响可能更多取决于土壤类型,且随着生育进程的推进,耕作对土壤的改善效应逐步减弱,土壤容重呈增加趋势,而土壤孔隙度则与不同的耕作方式相关^[24-25]。

在华北平原中北部,由于冬小麦、夏玉米两种作物的收获与播种时间间隔短,农村劳动力资源紧张,生产中为了抢播多采用冬小麦播前旋耕、夏玉米免耕播种的耕作方式,对深松耕作配套技术的研究相对较少,尤其是冬小麦播前深松对后茬夏玉米土壤物理性状和作物生长特性的研究更少。为此,本文以深松耕作方式下土壤物理性状及作物生长特性为切入点,研究冬小麦播前深松耕作方式对后茬夏玉米土壤物理性状、土壤水分变化、作物生长发育、产量及水分利用效率等影响,明确深松技术的后效性,为华北平原冬小麦—夏玉米一年两熟轮作区合理耕层构建提供基础数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2015 年 10 月 15 日至 2016 年 9 月 26 日在中国农业科学院新乡综合试验站进行,该试验点位于河南省新乡市(N35°19',E113°53',海拔 73.2 m),多年平均气温 14.1℃,无霜期 210 d,日照时数 2 398.8 h,光热资源丰富,以一年两熟耕作制度为主,多年平均降雨量为 582 mm,7—9 月占全年降水量的 70%~80%,多年平均

蒸发量 2 000 mm。夏玉米全生育期降雨量见图 1。总降雨量为 358.9 mm,7 月份降雨量明显高于同期多年平均降雨量,高达 228 mm,其中,7 月 9 日突降大雨,当日降雨量达 114 mm,7 月 19 日降雨量 58.5 mm,试验地的土壤质地为粉壤土,0—100 cm 土层容重为 1.53 g/cm³,

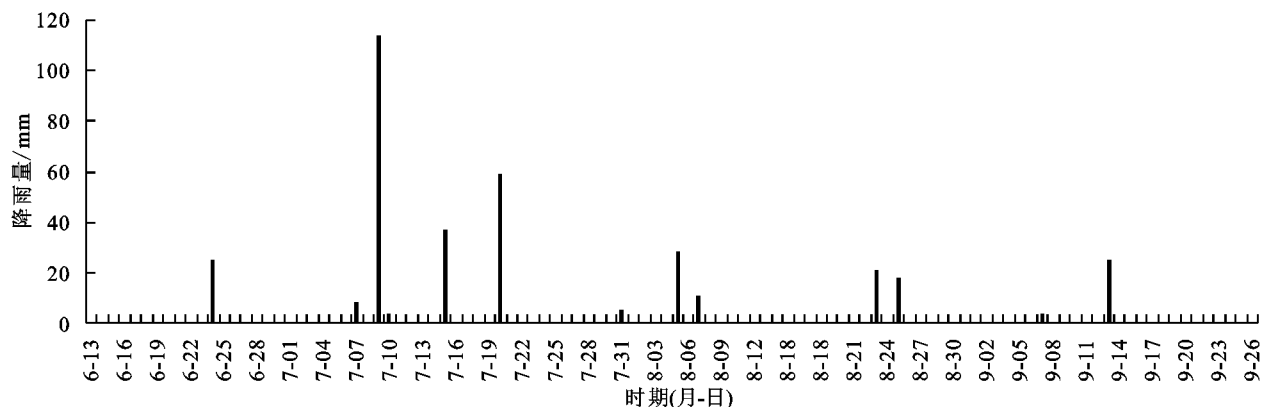


图1 夏玉米生育期降雨量

1.2 试验设计、耕作方式及供试品种

试验设冬小麦播前深松+旋耕、夏玉米留茬免耕(PS)与传统旋耕(CK)2个处理,采用单因素随机区组设计,每个处理3次重复,试验在大田小区内进行,共计6个小区,小区面积为 18 m×50 m=900 m²。

耕作处理过程为:(1)PS处理,于2015年10月前茬冬小麦播前,采用全方位深松机深松1遍,深松深度为40 cm,随后采用旋耕机旋耕1遍破碎0—15 cm表层土壤,为冬小麦播种出苗创造土壤条件;2016年6月10日冬小麦机械化收获3天后夏玉米免耕留茬播种。深松机采用山东大华机械有限公司的大华宝来1S-250型深松机,深松铲为全方位弧面倒梯型,同时作业行数为4行,铲间距62 cm,工作幅宽250 cm,配套动力≥88.2 kW,整机重900 kg,深松效率为225~450 hm²/h,作业深度≥30 cm。旋耕机采用河北双天机械制造有限公司的1GKN-220A1型中高箱旋耕机,外形尺寸为1 260 mm×2 570 mm×1 160 mm,工作宽幅220 cm,整机重量551 kg,配套动力44.1~58.8 kW,旋耕效率≥0.32 hm²/h。(2)CK处理,前茬冬小麦仅作旋耕处理,深度15 cm,次年收获后夏玉米免耕留茬播种。

供试后茬夏玉米品种为“登海605”,底肥采用“登海605”缓控释玉米专用掺混肥料(N-P₂O₅-K₂O 27-8-5 总养分≥40%)900 kg/hm²,种肥同播,期间无追肥,株距25 cm,行距60 cm,种植密度为6.7万株/hm²。2016年6月13日播种,2016年9月26日收获。由于播后及各生育期间降雨充沛,后茬夏玉米整个生育期无灌水,除耕作方式差异外,其他田间管理措施相同。

田间持水率为20.5%(质量含水率),地下水埋深大于5 m。1 m深土壤理化性质:pH 8.74,土壤电导率193.47 μS/cm。0—40 cm土壤养分含量分别为碱解氮48.68 mg/kg,速效磷15.19 mg/kg,速效钾97.15 mg/kg,有机质0.85 g/kg。

1.3 测定指标

1.3.1 土壤物理性质指标

(1)土壤粒径测定。于2016年7月25日,每20 cm为一层取0—60 cm深土层土壤,风干晾晒后过2 mm筛孔备样,采用BT-9300HT型激光粒度分布仪测定,每个处理3次重复。

(2)土壤容重及孔隙度测定。于夏玉米苗期、拔节期、抽雄吐丝期、灌浆成熟期,每个处理随机位置处挖取1 m×1 m×60 cm长方体坑,采用环刀法(体积为100 cm³)每10 cm为一层,分别测定0—40 cm土层土壤容重,同时测定土壤孔隙度,每层3次重复。

(3)土壤紧实度测定。采用土壤紧实度仪(Sc 900 Soil Compaction Mate),分别于夏玉米拔节期和灌浆成熟期各测定一次;取点分别位于各小区畦首(畦长1/5处)、畦中(畦长1/2处)、畦尾(畦长4/5处),测定深度为0—40 cm,每个测点3次重复。

1.3.2 土壤含水率 采用取土烘干法,每20 cm土层土壤分层测定,取样深度为0—100 cm。采用精度为0.01 g的电子天平称取湿土重和干土重,分别在夏玉米不同生育阶段始末用土钻钻取,取土点位于小区中部随机处,拔节期始至抽雄吐丝期末每5~7天观测0—60 cm土层土壤含水率以确定是否需要灌溉(灌水下限为田持的70%),每个处理3次重复。

土壤储水量采用公式(1)计算:

$$W = h \times a \times b \times 10 \quad (1)$$

式中:W为土壤储水量(mm);h为土层深度(cm);a为土壤容重(g/cm³);b为土壤水分含量(%),每20 cm为一层,计算不同层的土壤储水量,深度为1 m。

1.3.3 形态指标 定期观测植株生长发育情况,确定各生育期开始和结束时间,在夏玉米各生育期内,

每个小区随机选取 9 株测定,采用精度为 0.1 cm 的钢尺量取株高(最顶叶完全伸展至茎基部距离)、每片叶长,叶宽(最宽处)并按器官分离,采用 0.01 g 电子天平称取每部分(茎、叶、穗)干物质,105 ℃杀青 30 min,75 ℃烘干至恒重测定干物质重量。

叶面积指数(LAI)采用公式(2)计算:

$$LAI=0.75\rho\frac{\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^nL_{ij}\times W_{ij}}{10000\times m}\tag{2}$$

式中:0.75 为叶面积折算系数; ρ 为种植密度(6.7 万株/hm²); m 为测量株数; L_{ij} 和 W_{ij} 分别为第 i 株玉米的第 j 叶片的最大长度和宽度(cm)。

1.3.4 产量 收获时,每个小区随机选取 20 穗测定每穗的穗长、秃尖长、穗粗、行数、百粒重及穗粒重,采用精度为 0.1 cm 的钢直尺测量穗长和秃尖长;采用精度为 0.05 mm 的游标卡尺测量穗粗;采用精度为 0.01 g 的电子天平称量百粒重及穗粒重,并计算理论产量。

1.3.5 作物耗水量及水分利用效率 作物耗水量采用水量平衡方程计算,该地区地下水位埋藏较深(超过 20 m),可忽略地下水补给,由于试验期间的强降雨会引起径流和深层入渗,故采用降雨前后气象站资料推算植株腾发量数据并结合降水前后土壤含水率之差来推算有效降雨量,田间耗水量采用公式(3)计算:

$$ET=I+P_e+(W_0-W_t)\tag{3}$$

式中:ET 为田间耗水量(mm); I 为净灌水总量(mm)(本次试验未灌溉, $I=0$); P_e 为有效降雨量(mm); W_0 、 W_t 分别为生育阶段初期和末期土壤储水量(mm)。

水分利用效率采用作物产量与全生育期耗水量的比值,采用公式(4)计算:

$$WUE=\frac{Y}{ET}\times 10\tag{4}$$

式中:WUE 为水分利用效率(kg/m³); Y 为作物产量(kg/hm²); ET 为全生育期田间耗水量(mm)。

1.4 统计分析

采用 Excel 2013 对数据绘图分析处理,采用 SAS 9.2 对数据进行统计分析处理,差异显著性采用 LSD_{0.05}法检验。

2 结果与分析

2.1 冬小麦播前深松对夏玉米田土壤物理性状的影响

2.1.1 冬小麦播前深松对夏玉米田土壤粒径组成的影响 由表 1 可知,深松后 PS 处理 0—20,20—40,40—60 cm 土层土壤黏粒含量较 CK 均略有增加,而细砂粒含量较 CK 的略有减少,粉粒含量与 CK 基本一致,统计分析的差异均不显著。说明深松耕作在一定程度上有增加土壤耕层细颗粒含量和减少大颗粒含量的趋势,对土壤粒径组成的影响相对较小。

表 1 深松对土壤粒径组成的影响 单位:%

土层 深度/cm	黏粒(<0.002 mm)			粉粒(0.02~0.002 mm)			细砂粒(2~0.02 mm)		
	PS	CK	F 值	PS	CK	F 值	PS	CK	F 值
0—20	6.83±0.41a	6.34±0.63a	0.14	88.73±0.30a	88.51±1.50a	0.52	4.44±0.21a	5.15±1.69a	0.51
20—40	9.04±2.05a	8.14±2.65a	0.73	86.94±1.39a	87.04±1.88a	0.92	4.02±1.80a	4.83±1.98a	0.62
40—60	9.55±1.76a	8.90±1.59a	0.33	87.24±2.19a	87.71±0.46a	0.48	3.21±0.64a	3.40±1.36a	0.76

注:同一行数据后不同字母表示处理之间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.1.2 冬小麦播前深松对夏玉米田土壤容重和孔隙度的影响 由表 2 可知,PS 处理较 CK 降低了 0—40 cm 土层土壤容重,其中,苗期和拔节期差异显著,0—20 cm 土层,PS 处理较 CK 分别降低了 3.40%,3.23%;20—40 cm 土层,PS 处理较 CK 分别降低了 3.85%,2.53%。说明冬小麦播前深松耕作较传统耕作能显著降低后茬夏玉米苗期和拔节期

土壤容重。

随着生育进程的推进,PS 处理 0—20,20—40 cm 土层土壤容重仍低于 CK,处理间差异逐渐减小,甚至到夏玉米收获时已基本相同,主要原因可能有两方面:一是玉米表土层根系发达,固土作用强;二是夏玉米拔节期间强降雨引起表土层土壤溅蚀和水分入渗使得土壤踏实,进而导致耕层土壤板结。

表 2 不同耕作处理对 0—40 cm 土壤容重的影响 单位:g/cm³

土层 深度/cm	苗期		拔节期		抽雄吐丝期		灌浆成熟期	
	PS	CK	PS	CK	PS	CK	PS	CK
0—20	1.42b	1.47a	1.50b	1.55a	1.53a	1.56a	1.59a	1.60a
20—40	1.50b	1.56a	1.54b	1.58a	1.55a	1.58a	1.59a	1.60a

由表 3 可知,各生育时期土壤孔隙度变化与土壤容重变化相类似,PS 处理较 CK 提高了 0—40 cm 土层土壤孔隙度,其中,苗期和拔节期差异显著,0—20 cm 土层,PS 处理土壤孔隙度较 CK 分别提高了 2.11%,3.21%;20—40 cm 土层,PS 处理较 CK 分别提高

3.67%,2.68%;抽雄吐丝期和灌浆成熟期 0—40 cm 土层土壤孔隙度较 CK 提高,各处理间差异均未达到显著水平。

2.1.3 冬小麦播前深松对夏玉米田土壤紧实度的影响 由表 4 可知,PS 处理较 CK 降低了 0—40 cm 土层

土壤紧实度,其中,拔节期 PS 处理 0—10,10—20 cm 土层土壤紧实度较 CK 分别减小 1.48%,6.85%,差异不显著;20—30,30—40 cm 土层土壤紧实度较 CK 分别减小 37.76%和 22.26%,差异达到显著水平。

灌浆成熟期 PS 处理 0—10,10—20,20—30,30—40 cm 土层土壤紧实度较 CK 分别减小了 14.38%,1.09%,

1.22%,0.95%,差异均未达到显著水平。说明冬小麦播前深松较传统旋耕能显著减小夏玉米拔节期前犁底层附近处的土壤紧实度,为根系生长提供适宜的土壤环境,并且夏玉米拔节后的强降雨入渗及表土层根系的固土作用,到夏玉米灌浆后,深松耕作对土壤结构的改善效应逐步减弱,处理间差异减小。

表 3 不同耕作处理对 0—40 cm 土壤孔隙度的影响 单位: %

土层 深度/cm	苗期		拔节期		抽雄吐丝期		灌浆成熟期	
	PS	CK	PS	CK	PS	CK	PS	CK
0—20	43.13a	42.24b	39.27a	38.05b	37.86a	37.75a	35.50a	35.15a
20—40	41.26a	39.80b	39.42a	38.39b	37.60a	37.50a	35.20a	34.31a

表 4 不同耕作处理对 0—40 cm 土壤紧实度的影响 单位: MPa

耕作 方式	0—10 cm		10—20 cm		20—30 cm		30—40 cm	
	拔节期	灌浆成熟期	拔节期	灌浆成熟期	拔节期	灌浆成熟期	拔节期	灌浆成熟期
PS	1.33±0.32a	1.31±0.45a	2.31±0.21a	2.73±0.47a	2.06±0.15b	3.24±0.17a	2.48±0.06b	3.13±0.01a
CK	1.35±0.02a	1.53±0.65a	2.48±0.18a	2.76±0.23a	3.31±0.16a	3.28±0.06a	3.19±0.06a	3.16±0.05a

2.2 冬小麦播前深松对夏玉米土壤含水率的影响

由图 2 可知,PS 处理 0—20 cm 土层土壤含水率较 CK 偏低,苗期至成熟期分别降低了 1.44%,11.98%,4.87%,2.33%,10.24%。而 PS 处理较 CK 提高了 20—60 cm 土层土壤含水率,苗期至成熟期 20—40 cm 土层土壤含水率分别提高了 11.76%,3.28%,16.38%,2.48%,2.03%;40—60 cm 土层土壤含水率分别提高了 8.93%,4.09%,6.57%,1.40%,19.46%;60—100 cm 土层土壤含水率在全生育期内处理间无明显差异。说明冬小麦播前深松较传统耕作打破犁底层的同时在一定程度上也增加了夏玉米土壤含水率,且有利于降水的向下入渗,夏玉米主要根系活动层的土壤含水率增加。

2.3 冬小麦播前深松对夏玉米株高、叶面积指数及干物质积累量的影响

由图 3 可知,夏玉米从苗期至灌浆成熟期株高呈快速增长趋势,到抽雄吐丝期达最大值,而后趋于稳定,且全生育期 PS 处理株高均高于 CK,比较而言,由于 PS 处理使夏玉米主要活动根系层(20—60 cm)土壤含水率增加,导致处理间苗期至拔节期株高差异较小,而拔节期至抽雄吐丝期差异逐渐增大,灌浆开始后处理间株高差异达到最大并一直持续到收获。说明冬小麦播前深松较传统旋耕在一定程度上能够维持夏玉米生育初期良好的土壤结构和较高的根系层土壤含水率并促进了夏玉米株高的快速生长。

叶面积指数(LAI)是反映植物群体生长状况的一个重要指标,其大小直接反映了作物群体的光合生产能力,与最终群体产量的高低密切相关^[26]。由图 3 可知,夏玉米叶面积指数从苗期至拔节期增加迅

速,抽雄吐丝期达到最大,灌浆成熟期随着叶片的枯黄,叶面积指数开始下降,比较而言,全生育期 PS 处理叶面积指数均高于 CK,且拔节期至抽雄吐丝期处理间差异逐渐增大,说明冬小麦播前深松较传统耕作能促进夏玉米地上部植株营养生长,其叶面积不断增长,有利于夏玉米植株进行更多光合作用,有利于灌浆后产量的形成。

不同耕作方式对夏玉米各生育期干物质积累量的影响见表 5。全生育期 PS 和 CK 处理的茎、叶干物质积累量均呈现苗期小、拔节期快速增大,抽雄吐丝期达到最大,灌浆期有所回落;处理间表现为 PS 处理高于 CK,其中,拔节期茎、叶干物质积累量较 CK 分别提高 11.26%,9.18%,差异显著;抽雄吐丝期和灌浆成熟期穗干物质积累量较 CK 分别提高 15.15%,4.95%,差异显著;干物质积累总量方面,各生育期均表现为 PS 处理高于 CK,其中,拔节期处理间差异显著。说明冬小麦播前深松处理有利于提高夏玉米干物质生产能力和最终籽粒产量。

2.4 冬小麦播前深松对夏玉米产量及水分利用效率的影响

由表 6 可知,PS 处理较 CK 产量提高 9.50%,差异显著,其中,穗长和穗粒重分别提高 4.18%,6.50%,差异显著;穗粗、秃尖长、每穗行数和百粒重,处理间差异均不显著,说明冬小麦播前深松较传统耕作有利于提高夏玉米穗长和穗粒重,并最终实现增产。全生育期 PS 处理较 CK 田间耗水量增加 4.36%,水分利用效率提高 5.08%。这一结果说明,冬小麦播前深松耕作通过增加降水入渗,提高了夏玉米主要根系活动层土壤含水率,有利于根系对深层土壤水分和养分吸

收利用,促进了夏玉米地上部株高、叶面积生长和生物量积累及光合产物向籽粒的转化,从而提高了其产量和水分利用效率。

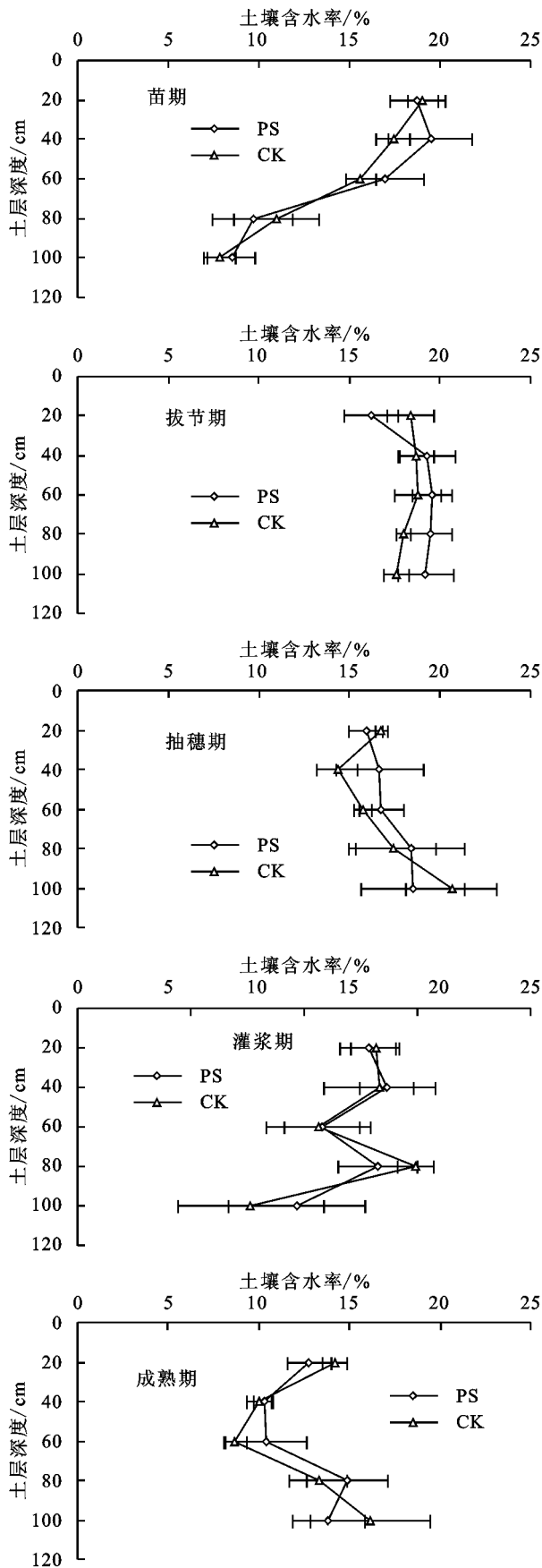


图 2 各生育期土壤含水率变化

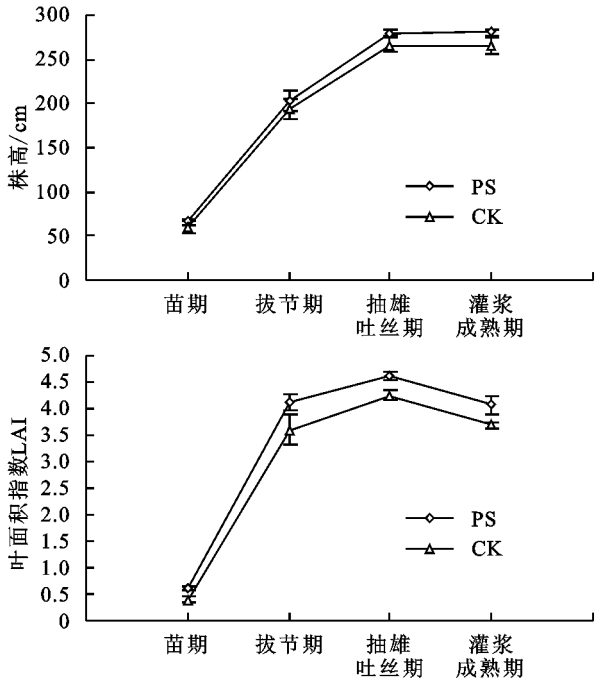


图 3 不同耕作处理对夏玉米株高和叶面积指数的影响

3 讨论

(1)冬小麦播前深松耕作改善了土壤结构,提高了土壤通透性,对后茬夏玉米土壤物理性状的影响主要体现在苗期和拔节期显著降低 0—40 cm 土层土壤容重、显著提高土壤总孔隙度,拔节期显著增大 20—40 cm 土层土壤紧实度,提高了后茬耕层全生育期 20—60 cm 土层土壤含水率,间接促进了作物苗期根系生长发育、拔节期地上部株高和叶面积增长,进而显著提高了拔节期茎、叶干物质积累量和抽穗吐丝期、灌浆成熟期穗干物质积累量,最终提高了产量。同时,深松也有利于促进降雨入渗和夏玉米主要根系活动层土壤储水量的增加,在本试验中,拔节期(强降雨前)两处理间土壤水分存在一定差异,而随着强降雨的来临,两处理间土壤含水率差异变小。夏玉米生育后期,PS 处理土壤物理指标与 CK 差异逐渐减小,原因除与夏玉米根系发育有一定关系外,主要是强降雨的雨滴打击力对土壤结构具有一定冲击和破坏作用,细土粒随水分入渗导致土壤容重增加,并引起表层土壤板结,这与肖继兵等^[4]、梁金凤等^[27]和王慧杰等^[28]的研究结果相似。Arvidsson 等^[29]研究中发现,中度紧实度有利于提高小麦玉米等单子叶植物产量,双子叶较单子叶植物对土壤紧实度更为敏感,在本次试验中土壤紧实度对产量的影响还需进一步深入研究,同时有必要开展不同降雨强度对麦前深松耕作模式下土壤物理性质影响的模拟研究,深入探讨耕作措施容重、土壤紧实度、总孔隙度和土壤含水率的关系,进一步明确深松作用的持续时间。

表 5 不同耕作处理对夏玉米干物质积累量的影响

单位: kg/hm²

生育阶段	耕作方式	茎	叶	穗	总累计量
苗期	PS	283.84±10.19a	142.46±2.69a	—	426.30±10.75a
6 月 14 日至 7 月 13 日	CK	262.37±16.24a	142.74±12.09a	—	405.11±27.73a
拔节期	PS	2582.59±100.04a	2597.51±119.61a	—	5180.10±185.23a
7 月 14 日至 8 月 8 日	CK	2321.29±74.17b	2379.00±149.87b	—	4700.30±178.80b
抽雄吐丝期	PS	4972.46±191.52a	2946.52±67.51a	4273.10±166.56a	12191.99±332.77a
8 月 9 日至 9 月 5 日	CK	4951.76±297.58a	2914.10±186.33a	3710.68±264.58b	11576.55±402.15a
灌浆成熟期	PS	4477.27±320.66a	2752.04±25.57a	15121.01±197.21a	22350.32±518.94a
9 月 5 日至 9 月 26 日	CK	4490.12±439.12a	2758.84±106.21a	14407.69±273.37b	21656.64±267.63a

注:相同生育时期、同一列数据后不同字母表示处理之间差异显著($p<0.05$)。

表 6 不同耕作处理对夏玉米产量、产量构成及水分利用效率的影响

耕作方式	穗长/ cm	秃尖长/ cm	穗粗/ cm	每穗 行数	百粒重/ g	穗粒重/ g	产量/ (kg·hm ⁻²)	田间耗 水量/mm	水分利用效率/ (kg·m ⁻³)
PS	20.92a	2.57a	47.87a	16.09a	37.56a	205.04a	10873.74a	351.15	3.10a
CK	20.08b	2.59a	48.03a	15.77a	37.13a	192.52b	9930.08b	336.49	2.95a

注:同一列数据后不同字母表示处理之间差异显著($p<0.05$)。

(2)冬小麦播前深松耕作能促进夏玉米植株生长发育并提高产量。晋鹏宇等^[30]研究表明,深松相比传统耕作,显著提高了夏玉米拔节期叶面积指数,进而提高了群体的净光合速率和光合性能;齐文增等^[31]、黄振喜等^[32]和黄明等^[33]研究表明,玉米干物质积累越多,籽粒产量也就越高,原因是较高的叶面积指数,增大了单位土地面积上的净光合量,相当于间接延长了光合作用时间,从而生产出更多同化物直接输送到籽粒,使得籽粒产量进一步提高。上述研究结论与本研究的结果相似,接下来有必要深入开展麦前深松对夏玉米根系分布和植株生理方向相关研究,进一步明确深松作用对植株营养生长、增产的机理。

4 结 论

冬小麦播前深松对土壤物理性状、株高叶面积指数和干物质积累量以及产量和水分利用效率均有一定影响,具体来讲:

(1)冬小麦播前深松耕作对后茬夏玉米土壤物理性状变化上。深松较传统耕作显著降低了苗期和拔节期 0—40 cm 土层土壤容重(2.53%~3.85%)、显著增大了土壤孔隙度(2.11%~3.67%);显著降低了拔节期 20—40 cm 土层土壤紧实度(22.26%~37.76%),为作物前期生长、后期高产创造了适宜的土壤环境条件;深松耕作在一定程度上能提高 20—60 cm 土层土壤含水率,全生育期土壤含水率较传统耕作提高 2.03%~19.46%,强降雨会对耕作后的土壤结构产生一定程度破坏;深松耕作对本试验地区粉壤土类型的土壤黏粒含量较传统耕作略有增加,细砂粒含量较传统耕作略有减小。

(2)冬小麦播前深松对后茬夏玉米生长具有一定的促进作用,全生育期深松耕作的株高叶面积指数均高于传统耕作,拔节期茎、叶干物质积累量上深松耕

作显著高于传统耕作,抽雄吐丝期和灌浆成熟期穗干物质积累量上深松耕作显著高于传统耕作。

(3)冬小麦播前深松较传统耕作显著提高夏玉米的穗长(4.18%)和穗粒重(6.50%),显著提高产量(9.50%),水分利用效率提高 5.08%。

参考文献:

[1] 王志穷,王维新,李霞,等. 保护性耕作条件下深松技术的国内外发展现状[J]. 农机化研究,2016,38(6):253-258.

[2] 齐华,刘明,张卫建,等. 深松方式对土壤物理性状及玉米根系分布的影响[J]. 华北农学报,2012,27(4):191-196.

[3] Cairns J. The status of the theoretical and applied science of restoration ecology[J]. Environmental Professional,1991,13(3):186-194.

[4] 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,2011,42(3):709-714.

[5] Berisso F E, Schjønning P, Keller T, et al. Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil[J]. Soil & Tillage Research,2012,122(6):42-51.

[6] 李华,逢焕成,任天志,等. 深旋松耕作法对东北棕壤物理性状及春玉米生长的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(3):647-656.

[7] 王长生,王遵义,苏成贵,等. 保护性耕作技术的发展现状[J]. 农业机械学报,2004,35(1):167-169.

[8] 黄健,王爱文,张艳茹,等. 玉米宽窄行轮换种植、条带深松、留高茬新耕作制对土壤性状的影响[J]. 土壤通报,2002,33(3):168-171.

[9] Jabro J D, Stevens W B, Iversen W M, et al. Tillage depth effects on soil physical properties, sugarbeet yield, and sugarbeet quality[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis,2010,41(7):908-916.

[10] 郭家萌,刘振朝,高强,等. 深松对玉米产量和养分吸收的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(2):249-254.

- [11] Botta G F, Jorajuria D, Balbuena R, et al. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus* L.) yields[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 91(1):164-172.
- [12] Alamouti M Y, Navabzadeh M. Investigation of plowing depth effect on some soil physical properties[J]. Pakistan Journal of Biological Sciences, 2007, 10(24): 4510-4514.
- [13] Liu X W, Zhang X Y, Chen S Y, et al. Subsoil compaction and irrigation regimes affect the root-shoot relation and grain yield of winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2015, 154(5):59-67.
- [14] 张洁,姚宇卿,金轲,等. 保护性耕作对坡耕地土壤微生物量碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4):126-129.
- [15] Xu D, Mermoud A. Modeling the soil water balance based on time-dependent hydraulic conductivity under different tillage practices[J]. Agricultural Water Management, 2003, 63(2):139-151.
- [16] 孔晓民,韩成卫,曾苏明,等. 不同耕作方式对土壤物理性状及玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(1): 108-113.
- [17] 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.
- [18] Mu X Y, Zhao Y L, Liu K, et al. Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat-maize cropping system on the North China Plain[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 78(8):32-43.
- [19] 秦红灵,高旺盛,马月存,等. 两年免耕后深松对土壤水分的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1):78-85.
- [20] DiAz-Zorita M. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays* L.) productivity[J]. Soil & Tillage Research, 2000, 54(1/2):11-19.
- [21] 郭静,周可金,刘芳,等. 小麦秸秆还田量和还田方式对砂姜黑土地玉米生长发育的影响[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(4):521-527.
- [22] 刘战东,刘祖贵,宁东峰,等. 深松耕作对玉米水分利用和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(5):6-12.
- [23] 许迪, Schmid R, Mermoud A. 夏玉米耕作方式对耕层土壤特性时间变异性的影响[J]. 水土保持学报, 2000, 14(1):64-70.
- [24] Anne K, Peter M, Nyambilila A, et al. Tillage effects on selected soil physical properties in a maize-bean intercropping system in Mwala District, Kenya[J]. International Scholarly Research Notices, 2014(7):1-12.
- [25] Osunbitan J A, Oyedele D J, Adekalu K O. Tiage effects on bulk density, Hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria [J]. Soil and Tillage Research, 2005, 82(1):57-64.
- [26] 任伟,赵鑫,黄收兵,等. 不同密度下增施有机肥对夏玉米物质生产及产量构成的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 120(10):1146-1155.
- [27] 梁金凤,齐庆振,贾小红,等. 不同耕作方式对土壤性质与玉米生长的影响研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4):945-950.
- [28] 王慧杰,郝建平,冯瑞云,等. 微孔深松耕降低土壤紧实度提高棉花产量与种籽品质[J]. 农业工程学报, 2015, 259(8):7-14.
- [29] Arvidsson J, Håkansson I. Response of different crops to soil compaction: Short-term effects in Swedish field experiments [J]. Soil & Tillage Research, 2014, 138(5):56-63.
- [30] 晋鹏宇,任伟,陶洪斌,等. 深松对夏玉米物质生产、光合性能及根系生长的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(1): 114-120.
- [31] 齐文增,陈晓璐,刘鹏,等. 超高产夏玉米干物质与氮、磷、钾养分配积累与分配特点[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1):26-36.
- [32] 黄振喜,王永军,王空军,等. 产量 15 000 kg/hm² 以上夏玉米灌浆期间的光合特性[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9):1898-1906.
- [33] 黄明,吴金芝,李友军,等. 不同耕作方式对旱作区冬小麦生产和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 50-54.

(上接第 103 页)

- [11] Herron N F, Hairsine P B. A scheme for evaluating the effectiveness of riparian zones in reducing overland flow to streams [J]. Australian Journal of Soil Research, 1998, 36(4):683-698.
- [12] Qiu Z. Assessing critical source areas in watersheds for conservation buffer planning and riparian restoration[J]. Environmental Management, 2009, 44(5):968-980.
- [13] Moore I D, Grayson R B, Ladson A R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications [J]. Hydrological Processes, 1991, 5(1):3-30.
- [14] Freeze R A, Cherry J A. Groundwater [M]. Englewood Cliff: Prentice-Hall, 1979:604.
- [15] Huang X D, Shi Z H, Fang N F, et al. Influences of land use change on baseflow in mountainous watersheds[J]. Forests, 2016, 7(1):16.