

华北典型区域土壤耕作方式对土壤特性和作物产量的影响

关劼兮, 陈素英, 邵立威, 张玉铭, 张喜英, 路杨, 闫宗正

引用本文:

关兮, 陈素英, 邵立威, 等. 华北典型区域土壤耕作方式对土壤特性和作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(11): 1663–1672.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190246>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深松深度对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响

Effects of subsoiling depth on topsoil properties, crop yield and water use efficiency in Lime Concretion Black soil

中国生态农业学报. 2018, 26(9): 1355–1365 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.171149>

耕作方法对黄土高原旱作玉米产量和土壤水温特性的影响

Effect of different tillage practice on rain-fed maize yield and soil water/temperature characteristics in the Loess Plateau

中国生态农业学报. 2015(11): 1384–1393 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150021>

不同轮耕方式对渭北旱塬麦玉轮作田土壤物理性状与产量的影响

Effects of different rotational tillage patterns on soil physical properties and yield of winter wheat–spring maize rotation field in Weibei highland

中国生态农业学报. 2015(9): 1102–1111 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150175>

不同耕整地方式对甘蔗耕层结构特性及产量的影响

Effect of tillage mode on soil structure characteristics of plough layer and sugarcane yield

中国生态农业学报. 2018, 26(6): 824–836 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170918>

耕作与施肥对旱地玉米田土壤耗水量和水分利用效率的影响

Effect of tillage and fertilization on water use efficiency of maize in dryland conditions

中国生态农业学报. 2017, 25(6): 856–864 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160990>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190246

关劫兮, 陈素英, 邵立威, 张玉铭, 张喜英, 路杨, 闫宗正. 华北典型区域土壤耕作方式对土壤特性和作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(11): 1663–1672

GUAN J X, CHEN S Y, SHAO L W, ZHANG Y M, ZHANG X Y, LU Y, YAN Z Z. Soil tillage practices affecting the soil characteristics and yield of winter wheat and summer maize in North China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(11): 1663–1672

华北典型区域土壤耕作方式对土壤特性和作物产量的影响*

关劫兮^{1,2}, 陈素英^{1**}, 邵立威¹, 张玉铭¹, 张喜英¹, 路杨^{1,2}, 闫宗正^{1,2}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 华北平原是我国重要的小麦玉米种植区, 长期土壤旋耕免耕和秸秆全量还田带来耕层变浅、犁底层变厚和上移、土壤养分表聚等现象, 通过耕作方式改变, 解决上述问题对维持区域粮食生产有重要意义。试验以冬小麦-夏玉米轮作系统为研究对象, 分别在代表华北平原高产区的栾城试验区和代表中低产区的南皮试验区进行, 设置冬小麦播种前进行土壤深耕、深松、窄深松3种处理, 以生产上常用的旋耕为对照。所有处理夏玉米季均采用土壤免耕播种, 测定项目包括土壤容重、作物根系、作物产量和水分利用效率。结果表明, 不同耕作方式对土壤特性和作物产量的影响具有区域差异。南皮试验区土壤深耕(松)显著地($P<0.05$)提高了作物产量, 深耕、深松和窄深松处理的冬小麦产量比旋耕分别增加16.5%、19.3%和13.1%, 夏玉米产量分别增加17.3%、16.2%和21.9%, 周年产量分别增加16.9%、17.6%和17.8%; 深耕、深松和窄深松处理间作物产量差异不显著。栾城试验区冬小麦、夏玉米产量和周年产量各处理之间差异不显著。土壤深耕、深松、窄深松和旋耕均能降低0~20 cm土层土壤紧实度和土壤容重。冬小麦播种后, 与土壤耕作前比较, 土壤深耕、深松和旋耕处理土壤紧实度南皮试验区分别平均降低71.6%和68.2%, 栾城试验区分别降低88.8%和-7.7%, 常用的旋耕模式在栾城试区没有降低土壤紧实度。小麦收获时不同耕作方式0~40 cm土层的土壤容重均低于土壤耕作前的土壤容重, 至夏玉米收获时不同耕作处理的土壤容重与耕作前基本一致, 不同耕作处理对土壤容重的影响差异不显著。在南皮试验区, 3种耕作方式与旋耕相比, 均显著提高了冬小麦和夏玉米水分利用效率; 在栾城试验区, 各处理冬小麦和夏玉米水分利用效率差异不显著。本研究结果显示在华北平原高产区连续实施土壤旋耕模式没有影响作物产量, 而在中低产区实施土壤深耕或者深松模式更利于作物产量提高。

关键词: 小麦玉米一年两熟; 高产区; 中低产区; 耕作方式; 土壤容重; 产量构成; 水分利用效率

中图分类号: S342

文章编号: 2096-6237(2019)11-1663-10

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Soil tillage practices affecting the soil characteristics and yield of winter wheat and summer maize in North China*

GUAN Jiexi^{1,2}, CHEN Suying^{1**}, SHAO Liwei¹, ZHANG Yuming¹, ZHANG Xiying¹,

* 国家重点研发计划专项(2016YFD0300808, 2016YFC0401403)和国家自然科学基金项目(31371578)资助

** 通信作者: 陈素英, 主要从事农田节水和保护性耕作技术研究。E-mail: csy@sjziam.ac.cn

关劫兮, 主要从事农田节水机理与技术研究。E-mail: gjx391214674@qq.com

收稿日期: 2019-04-02 接受日期: 2019-06-04

* This study was supported by the National Key R&D Program of China (2016YFD0300808, 2016YFC0401403) and the National Natural Science Foundation of China (31371578).

** Corresponding author, E-mail: csy@sjziam.ac.cn

Received Apr. 2, 2019; accepted Jun. 4, 2019

LU Yang^{1,2}, YAN Zongzheng^{1,2}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Agricultural Water-saving, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The North China Plain (NCP) is one of the most intensively farmed agricultural regions in China, with approximately 70% of the total cultivated land being used for an annual double-cropping system of winter wheat and summer maize. Owing to the long-term rotary and no tillage practices accompanying with the whole straw of winter wheat and summer maize return to field for several years, soil physical characteristics are gradually changing in terms of the increased soil pan depth, bulk density and content of soil nutrients in the surface soil layer. Improving soil quality by changing the tillage practices might help to maintain crop productivity in this region. An experiment was conducted for the winter wheat-summer maize rotation system in Luancheng County, which represented a high yield region, and in Nanpi County, which represented a medium and low yield region, in the NCP. Four treatments — soil deep tillage (DT), subsoiling (SS), narrow subsoiling (NSS), and rotary tillage (control, CK) — before winter wheat sowing and no tillage before summer maize sowing to all treatments were simultaneously conducted at the two areas. Soil bulk density, crop root growth, soil water use, yield and water use efficiency (WUE) were monitored throughout. Results showed that the effects of different tillage practices on soil and crop were different in the two regions. At Nanpi, deep tillage and subsoiling significantly increased crop yield. Compared with traditional rotary tillage, winter wheat yield was improved by 16.5% under DT, 19.3% under SS, and 13.1% under NSS. Yield of summer maize was increased by 17.3%, 16.2%, and 21.9%, respectively, with annual yield increases of 16.9%, 17.6% and 17.8%, respectively. Yield differences were not observed among the DT, SS, and NSS treatments. However, no significant difference in crop yield among the four treatments was found at Luancheng. Furthermore, four tillage practices reduced soil penetration resistance and bulk density for the 0–20-cm soil layer in both Luancheng and Nanpi. At Nanpi, after sowing winter wheat, the soil penetration resistance of the 0–20-cm soil layer under DT, SS, NSS and CK decreased by 69.7%, 72.7%, 72.5% and 68.2%, respectively. At Luancheng, soil penetration resistance of the 0–20-cm soil layer was reduced by 88.8% averagely under treatments of deep tillage and subsoiling, and slightly increased by 7.7% under CK. Soil bulk density of the 0–40-cm soil layer under the four tillage treatments were all lower at wheat harvest compared with that before tillage. Until the summer maize harvest, soil bulk density under different tillage treatments was essentially similar to that before tillage, and there was no significant difference among the four tillage treatments. At Nanpi, WUE of winter wheat and summer maize was significantly increased under DT, SS, and NSS compared with that under CK. At Luancheng, the WUE of winter wheat and summer maize was similar among the four treatments. These results indicated that different tillage practices in the low yield regions benefited crop production and water productivity. However, in the high yield regions, the three tillage practices did not enhance crop performance compared with traditional tillage practice. Therefore, it is suggested that the model of soil rotary tillage can be continuously implemented in the high yield regions of the NCP, whereas DT can be beneficially implemented in the medium and low yield regions.

Keywords: Winter wheat-summer maize rotation system; High-yield area; Medium and low-yield area; Tillage pattern; Soil bulk density; Yield composition; Water use efficiency

华北平原是我国重要的粮食生产基地之一, 70%以上的耕地实施冬小麦(*Triticum aestivum*)和夏玉米(*Zea mays*)一年两熟轮作制。20世纪80年代开始, 随着秸秆焚烧的禁止, 秸秆机械化还田和土壤旋耕作业迅速发展, 土壤耕作采用冬小麦旋耕后播种, 夏玉米免耕播种, 秸秆全量还田。由于长期实施单一土壤免耕、旋耕和秸秆还田, 加上农业全程机械化生产对土壤的压实作用, 导致耕层变浅、犁底层加厚、土壤容重增大、耕层有效土量减少、土壤养分表聚等土壤退化特征突出^[1-2], 严重阻碍了作物根系的深层分布和水肥吸收功能^[3-5], 降低了作物的水肥资源利用率, 限制了作物产量的提高^[6-9]。因此,

改进土壤耕作方式对缓解土壤退化, 提升粮食持续生产具有重要意义。

传统的深耕(松)可以拓展土壤耕层深度, 打破犁底层, 改善耕层土壤物理性状, 从而促进作物生长, 提高作物的水分利用效率和产量^[10-13]。通过深耕可以将聚集在上层土壤中多年未分解的秸秆翻压到耕层以下, 加速其分解, 解决养分表聚问题^[14-15]。同时, 深耕可减少作物土传病虫害的发生^[16]; 深松可有效打破犁底层的限制, 促进作物根系深扎^[17], 降低土壤紧实度和容重^[18], 构建疏松的土壤耕层, 提高土壤的蓄水和保水能力, 提高作物产量^[19]。通过深耕(松)改善土壤理化性状、提高土壤蓄水保水保

肥能力已成为该领域研究热点。

土壤深松技术在华北平原实施多年, 关于深松对土壤理化性状、作物产量、水分利用效率、作物根系和深松深施肥等方面的影响前人已经进行了大量研究, 但大部分研究是同一地点进行, 对不同区域不同土壤类型、气候条件和灌溉方式下的比较研究较少, 不同区域土壤最适宜的土壤耕作模式也不明确。本文通过研究了不同区域土壤深耕(松)对作物产量、产量构成、土壤容重和作物根系的影响, 提出适合不同区域的土壤耕作模式。

1 材料与方法

1.1 试验地点描述

试验于 2016 年 10 月—2017 年 9 月分别在华北平原的中国科学院栾城农业生态系统试验站(以下简称栾城试验区, LC)和中国科学院南皮生态农业试验站(以下简称南皮试验区, NP)进行。根据河北省 2015 年农村统计年鉴, 南皮县的冬小麦和夏玉米产量分别为 $6\ 049.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $5\ 367.0\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 栾城县分别为 $7\ 606.8\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $7\ 876.8\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。南皮县产量较低的主要原因一是该区历史上土壤盐渍化较严重, 20 世纪 90 年代以后随着区域地下水位下降, 土壤逐渐脱盐, 但大部分土壤仍为轻度盐渍化; 二是该区域农田化肥投入一直处于较低水平, 2015 年统计数据表明, 南皮县的化肥投入平均为 306.6

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 栾城县为 $476.8\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。根据作物产量水平, 栾城试验区代表华北平原的高产区, 南皮试验区代表中低产区。

栾城试验区位于 $37^{\circ}53'N$ 、 $114^{\circ}41'E$, 海拔 $50.1\ \text{m}$ 。属于暖温带半湿润、半干旱季风气候, 雨热同期, 年平均气温 12.0 , 年日照时数 $2\ 608\ \text{h}$, 多年平均降雨量 $480\ \text{mm}$, 土壤为褐土类灰黄土种, 土壤质地以壤土为主, 地下水埋深 $42\ \text{m}^{[20]}$ 。南皮试验区位于 $38^{\circ}06'N$ 、 $116^{\circ}40'E$, 海拔 $20\ \text{m}$ 。属于暖温带半湿润季风气候区, 年均气温 12.3 , 年日照时数 $2\ 938.6\ \text{h}$, 年均降水量 $524.5\ \text{mm}$, 土壤类型为潮土, 土壤质地以壤土为主^[21-22], 浅层地下水位埋深 $2\sim 10\ \text{m}$, 为微咸水(矿化度 $\leq 3\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)^[23]。两个试验区的种植制度均为冬小麦-夏玉米一年两熟制, 两季秸秆长期连续全量还田。冬小麦秸秆覆盖还田, 即冬小麦机械收获时同时将秸秆抛撒地表, 夏玉米免耕播种, 夏玉米生育期粉碎的小麦秸秆一直在地表覆盖。夏玉米秸秆粉碎还田, 即夏玉米收获后利用秸秆粉碎机机械粉碎后, 土壤旋耕($7\sim 10\ \text{cm}$), 粉碎的玉米秸秆与表层 $0\sim 10\ \text{cm}$ 土壤混合。两个站点的试验地土壤养分背景值详见表 1。0~20 cm 土壤有机质、全氮、速效氮、速效钾和速效磷含量栾城试验区比南皮试验区分别高 43.1% 、 34.3% 、 57.1% 、 3.4% 和 -27.5% , 南皮试验区土壤速效磷含量高于栾城试验区, 其他土壤养分含量均低于栾城试验区。

表 1 南皮试验区和栾城试验区土壤养分含量(2016 年 10 月)

Table 1 Soil nutrients contents in Nanpi experiment site and Luancheng experiment site in October 2016

土层深度 Soil depth (cm)	南皮试验区 Nanpi experiment site					栾城试验区 Luancheng experiment site				
	有机质 Organic matter ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 Total nitrogen ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效氮 Available nitrogen ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available phosphorus ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available potassium ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机质 Organic matter ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 Total nitrogen ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效氮 Available nitrogen ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available phosphorus ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available Potassium ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
0~10	16.29	1.07	83.22	16.19	120.17	21.76	1.34	117.96	11.31	117.35
10~20	8.91	0.62	44.90	6.27	74.42	14.29	0.93	83.32	4.97	83.83
20~30	5.69	0.41	27.67	3.50	67.96	8.49	0.58	48.37	2.13	79.22
30~40	4.71	0.32	21.86	1.83	61.50	6.63	0.48	36.53	1.75	82.42

1.2 试验处理

两个试验区的试验处理相同, 都是在连续多年秸秆全量还田和土壤旋耕的基础上进行。试验共设置 4 个处理: 1) 土壤常规旋耕(CK), 9 月底至 10 月初夏玉米收获后, 用玉米秸秆粉碎机(165 型)将玉米秸秆粉碎 2 遍, 用旋耕犁(1GKNB-420 型变速)旋耕 2 遍, 深度为 $7\sim 10\ \text{cm}$, 粉碎的玉米秸秆与表层 $0\sim 10\ \text{cm}$ 土壤混合, 立即播种冬小麦; 2) 土壤深耕(deep tillage, DT), 夏玉米秸秆粉碎后用 1L-435 深耕犁深耕 1 遍,

深度为 $20\sim 25\ \text{cm}$, 随着表层土壤翻转, 粉碎的玉米秸秆分布于 $0\sim 25\ \text{cm}$ 土壤, 旋耕 1 遍后播种小麦; 3) 土壤深松(subsoiling, SS), 夏玉米秸秆粉碎后用深松犁(1S-200L)深松, 深度为 $30\sim 35\ \text{cm}$, 2 个深松犁之间的宽度为 $60\ \text{cm}$, 深松后旋耕 1 遍播种小麦, 深松处理的玉米秸秆分布于 $0\sim 10\ \text{cm}$ 土壤; 4) 土壤窄深松(narrow subsoiling, NSS): 作业方式和机具与 SS 处理相同, 由于 2 个深松犁之间的宽度为 $30\ \text{cm}$, 相对于 SS 处理较窄。4 个处理的冬小麦采用 2BXF-18

小麦播种机播种, 播种后立即擦地。玉米采用 2BYFSF 玉米播种机播种。试验小区面积 $7\text{ m} \times 8\text{ m}$, 4 次重复。

1.3 试验管理

栾城试验区和南皮试验区试验的冬小麦品种分别为‘科农 199’和‘衡 5229’, 夏玉米品种分别为‘郑单 958’和‘华农 866’, 均为当地主栽品种。灌溉方式栾城站为喷灌, 南皮站为畦灌, 小麦生育期灌溉均为拔节期灌溉 1 水, 灌溉时用水表计量, 灌溉量为 $750\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。栾城试验区冬小麦底肥施用磷酸二胺复合肥和尿素, N 为 $125\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 为 $158\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 拔节期追尿素 $105\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 玉米一次底施玉米专用肥(28-5-7) $715\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。南皮试验区冬小麦底肥施用磷酸二胺复合肥和尿素, N 为 $140\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 为 $150\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 拔节期追尿素 $140\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 玉米一次底施玉米专用肥(28-5-7) $900\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

栾城试验区小麦播种和收获时间分别为 2016 年 10 月 8 日和 2017 年 6 月 8 日, 播种量为 $300\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 夏玉米播种和收获时间分别为 2017 年 6 月 10 日和 2017 年 9 月 29 日, 播种量为 $45\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。南皮试验区小麦播种和收获时间分别为 2016 年 10 月 21 日和 2017 年 6 月 10 日, 播种量为 $450\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 夏玉米的播种和收获时间分别为 2017 年 6 月 15 日和 2017 年 10 月 5 日, 播种量为 $45\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.4 参数测定及计算方法

土壤容重: 分别在试验开始前、冬小麦收获期和夏玉米收获期, 用环刀法分层测定 0~40 cm 土层土壤容重, 每 10 cm 一层, 每个处理测定 3 次重复。将不锈钢环刀中的原状土样转移到铝盒中, 在 105 下烘 24 h 称重, 计算单位体积中烘干土的质量。

土壤紧实度: 在试验开始前和冬小麦播种后, 采用 SC-900 土壤坚实度仪测定(SPECTRUM, USA), 测定总深度为 0~45 cm, 每 2.5 cm 测定 1 个数据, 每个处理测定 6 次重复。

小麦根长密度: 在冬小麦成熟时, 用直径 10 cm 的根钻取 0~10 cm 土壤样品, 取样时根钻中心置于作物行上和行间交界处, 10 cm 为 1 个层次, 共 10 个深度。每个处理层 4 个重复。取样后立即带回实验室, 用 0.25 mm 土壤筛洗净根系, 去除杂质, 然后用 1.27 cm 刻度根盘测量根长。用测定的不同深度根长值, 计算根长密度(RLD)。根长密度定义为单位土壤体积中的根长, 单位为 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。不同取样地点某一特定深度的根长密度为 4 个取样重复的平均值。

土壤含水量: 采用土钻法取土烘干, 每 20 cm

为 1 层, 每个处理测定 3 次重复。

农田耗水(ET)根据水量平衡公式计算:

$$ET = \text{SWD} + P + I + W - D - R \quad (1)$$

式中: ET 为作物实际耗水量(mm), SWD 为生育期土壤水分消耗量(mm), P 为降雨量(mm), I 为灌溉量(mm), W 为土壤毛细管提升水(mm), D 为水分下渗量(mm), R 为地表径流量(mm)。试验期间没有发现地表径流, R 忽略不计; 栾城试验区水位埋深 40 m, 南皮试验区的地下水位埋深虽然较浅, 本文中只计算了 0~1 m 的土壤消耗, 土壤毛细管提升 W 值可以忽略。在本试验中 W 和 R 值设定为 0。因此, 公式(1)可以简化为 $ET = \text{SWD} + P + I - D$ 。公式中的根区土壤水分下渗量(D)根据文献^[24]计算。

水分利用效率(WUE, $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$)计算公式为:

$$\text{WUE} = Y / \text{ET} \quad (2)$$

式中: Y 为经济产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), ET 为农田耗水量(mm)。

冬小麦和夏玉米产量、生物量、产量构成测定: 冬小麦和夏玉米收获时各小区单独收获, 脱粒晒干后计算小麦和玉米籽粒产量, 折算成单产。并随机在每个小区内选择 60 穗小麦和 3 株玉米考种, 考种项目包括生物量、穗数、穗粒数、千粒重。

1.5 气象数据

栾城试验区的气象数据来自本试验站建有的标准气象站, 气象站距离试验地 50 m。南皮试验区的气象数据来自距离该试验站最近的国家标准气象站——泊头气象站($38^{\circ}08'N$, $116^{\circ}55'E$, 海拔 13.2 m)。

1.6 数据处理

各处理取多次重复测定的数据计算平均值, 并计算标准偏差; 方差和相关性分析用 SPSS 11.0 进行, 用 SPSS 软件分析不同处理间显著性。用 Excel 软件做图, 处理之间的显著性分析均在 $P < 0.05$ 水平。

2 结果与分析

2.1 试验期间气象条件

南皮和栾城试验区气象条件存在较大差异。表 2 为试验期间冬小麦和夏玉米生育期主要气象因素比较。可以看出, 两试验区冬小麦生育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、日均温和降雨量基本相同; 日照时数相差较大, 南皮试验区生育期总日照时数比栾城试验区高 20.0%。夏玉米生育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温基本相同, 南皮试验区比栾城试验区降雨量高 116.2%, 日均温高 20.2%, 日照时数高 8.3%。冬小麦和夏玉米生育期每月日照时数和每天的温度日较差见图 1, 南皮试验区的月日照时数和温度日较差均高于栾城试验区。

表 2 南皮试验区和栾城试验区冬小麦和夏玉米生育期气象因素
Table 2 Weather conditions during the growing seasons of winter wheat and summer maize in Nanpi experiment site and Luancheng experiment site

气象要素 Meteorological factor	南皮试验区 Nanpi experiment site		栾城试验区 Luancheng experiment site	
	冬小麦 Winter wheat	夏玉米 Summer maize	冬小麦 Winter wheat	夏玉米 Summer maize
降雨量 Rainfall (mm)	81.6	401.0	78.0	185.5
≥10 积温 Accumulate temperature ≥ 10 ()	1 719.4	2 911.0	1 690.1	2 904.8
日均温 Daily mean temperature ()	9.17	31.16	8.54	25.93
日照时数 Sunshine hours (h)	1 446.3	681.7	1 205.6	629.4

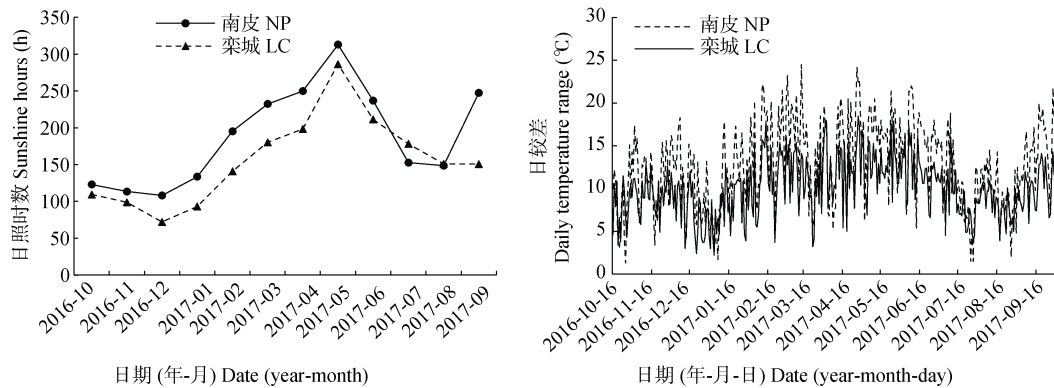


图 1 南皮试验区(南皮)和栾城试验区(栾城)逐月日照时数和温度日较差(2016年10月至2017年9月)

Fig. 1 Monthly average sunshine hours and daily temperature range of Nanpi experiment site (NP) and Luancheng experiment site (LC) from October 2016 to September 2017

2.2 耕作方式对土壤紧实度和容重的影响

土壤紧实度和土壤容重是土壤耕性的重要指标,紧实度和容重大的土壤影响水分入渗、根系下扎和肥料利用效率。2016年11月小麦播种后进行了土壤紧实度的测定,结果表明,土壤深耕(松)可以降低土壤耕层的紧实度(图2)。在南皮试验区,与土壤耕作前相比,不同土壤耕作均降低0~20 cm土壤紧实度,深耕、深松、窄深松和旋耕分别降低69.7%、72.7%、72.5%和68.2%,处理间差异不显著。20~45 cm分别降低6.7%、14.0%、28.7%和-7.0%,土壤旋耕处理的紧实度大于耕作前,窄深松处理与其他3个处理间差异显著($P < 0.05$),其他3个处理间差异不显著。0~20 cm土壤紧实度降低程度大于20~45 cm。在栾城试验区,与土壤耕作前相比,不同土壤耕作均降低0~20 cm和20~45 cm的土壤紧实度。0~20 cm深耕、深松、窄深松和旋耕分别降低52.0%、53.3%、161.0%和-7.7%,土壤旋耕紧实度大于土壤耕作前,窄深松的紧实度下降最明显。20~45 cm深耕、深松、窄深松和旋耕分别降低31.0%、35.1%、65.0%和41.7%,土壤紧实度降低程度大于南皮试验区。两个区域土壤紧实度比较,南皮的土壤紧实度最大值位于2 000~2 500 kPa,栾城的土壤紧实度最大值位于2 500~3 000 kPa,栾城的土壤紧实度最大值大于南皮。

土壤深耕(松)可以降低土壤耕层的容重(图3)。南皮试验区冬小麦播种前(2016年10月)进行土壤深耕、深松、窄深松和旋耕后,冬小麦收获时(2017年6月)的土壤容重与播种前比较,0~40 cm土壤容重均出现了显著降低($P < 0.05$);夏玉米收获时(2017年10月)土壤容重与播种前相差不大。土壤深耕和深松处理在夏玉米收获时,20 cm土层土壤容重仍低于播种前,而窄深松和旋耕处理则与播种前的土壤容重基本相同。栾城试验区的土壤容重变化与南皮站基本一致,小麦收获时与播种前相比土壤容重都出现了降低,但降低不显著($P < 0.05$)。夏玉米收获时土壤容重与播种前的容重相差不大,20 cm处土壤深耕(松)处理的土壤容重低于播种前处理。

2.3 耕作方式对冬小麦根系的影响

根长密度是反映作物根系生长发育状况的指标之一,不同耕作方式下冬小麦收获时的根长密度详见图4。可以看出,两个试验区冬小麦根长密度分布趋势一致,均表现为表层大于下层。0~100 cm平均根长密度南皮试验区为 $1.26 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$,栾城试验区为 $1.42 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$,栾城试验区比南皮高12.7%。分层来看0~20 cm土层平均根长密度两试验区基本相同,但20~40 cm和40~100 cm平均根长密度栾城比南皮分别高20.0%和21.4%。从耕作方式对冬小麦根长密

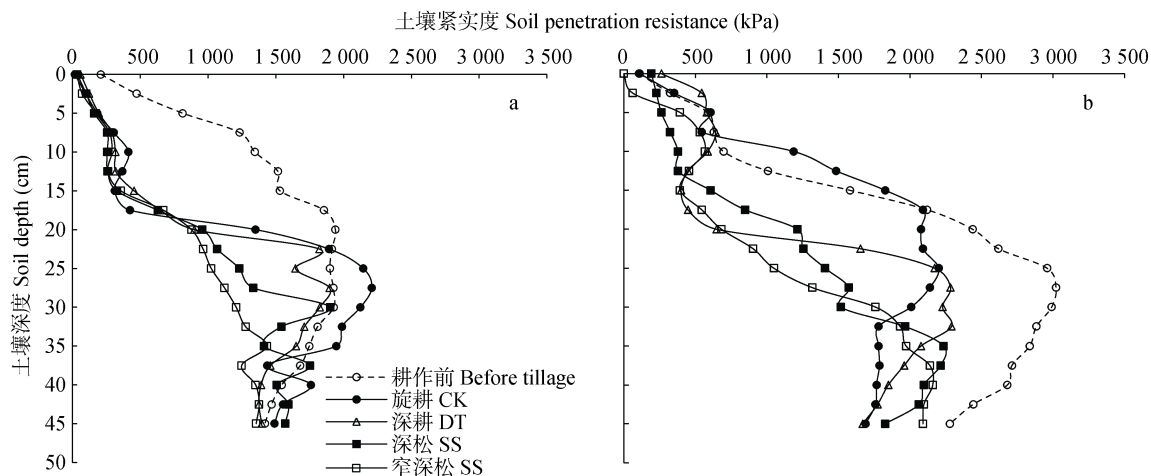


图 2 不同耕作措施对南皮试验区(a)和栾城试验区(b)小麦苗期土壤紧实度的影响(2016 年 11 月)

Fig. 2 Effects of tillage patterns on soil penetration resistance at seedling stage of winter wheat at Nanpi experiment site (a) and Luancheng experiment site (b)

CK: rotary tillage; DT: deep tillage; SS: subsoiling; NSS: narrow subsoiling.

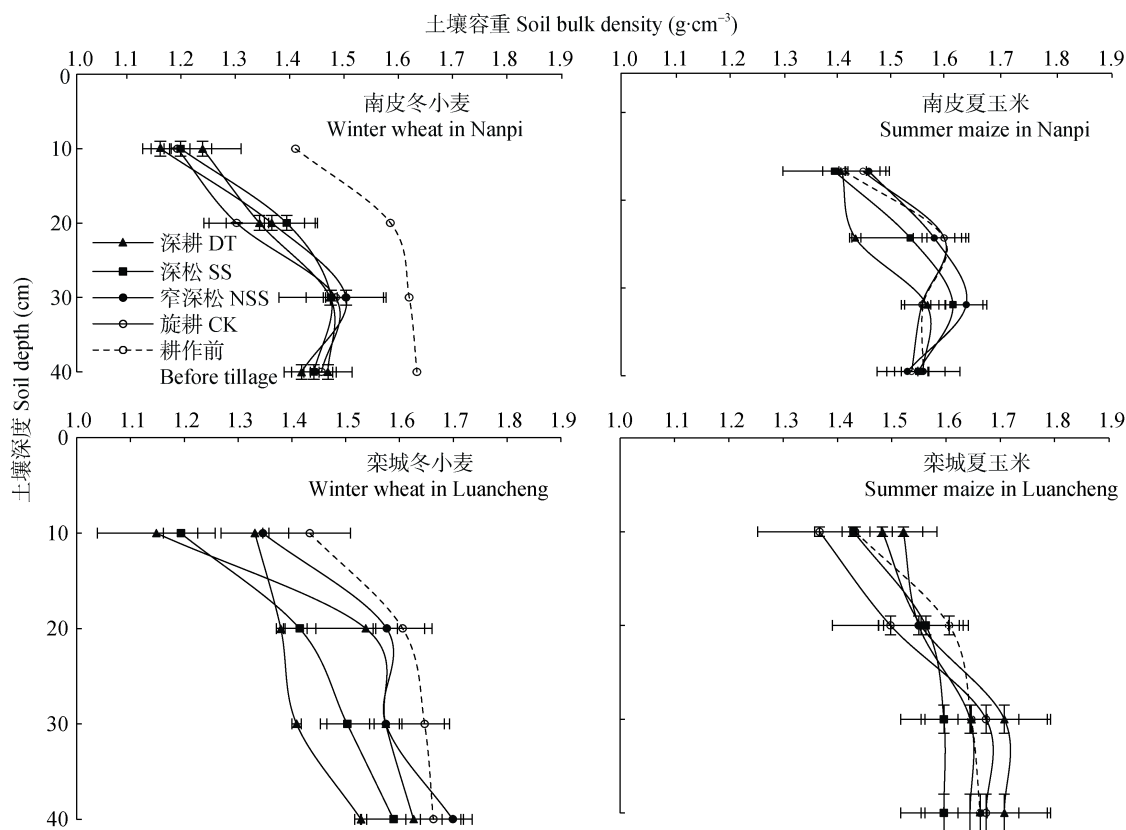


图 3 不同耕作措施对南皮试验区和栾城试验区冬小麦和夏玉米收获时土壤容重的影响

Fig. 3 Effects of tillage patterns on soil bulk density at harvest of winter wheat and summer maize at Nanpi experiment site and Luancheng experiment site

DT: deep tillage; SS: subsoiling; NSS: narrow subsoiling; CK: rotary tillage.

度的影响来看, 栾城试验区和南皮试验区耕作方式对冬小麦根长密度的影响均不显著。

2.4 耕作方式对土壤水分和作物水分利用效率的影响

土壤水分是供给作物用水的重要来源。不同耕

作方式对土壤水分的影响具有相同的趋势, 图 5 为代表性的深耕和旋耕处理对土壤水分的影响。可以看出, 无论是旋耕还是深耕处理, 小麦从播种到收获, 南皮试验区 0~2 m 土壤水分高于栾城试验区。小麦收获时, 栾城 0~2 m 土壤含水量从上至下为

10%左右, 整体处于较低状态; 南皮试验区 0~1 m 土层含水量很低, 表层基本达到凋萎湿度, 但 1~2 m 土层含水量较高。至夏玉米收获时, 随着夏玉米生育

期灌溉和降雨的补充, 土壤含水量整体比冬小麦收获时提高, 南皮试验区由于降雨远高于栾城试验区, 其 1~2 m 土层的土壤含水量较高。

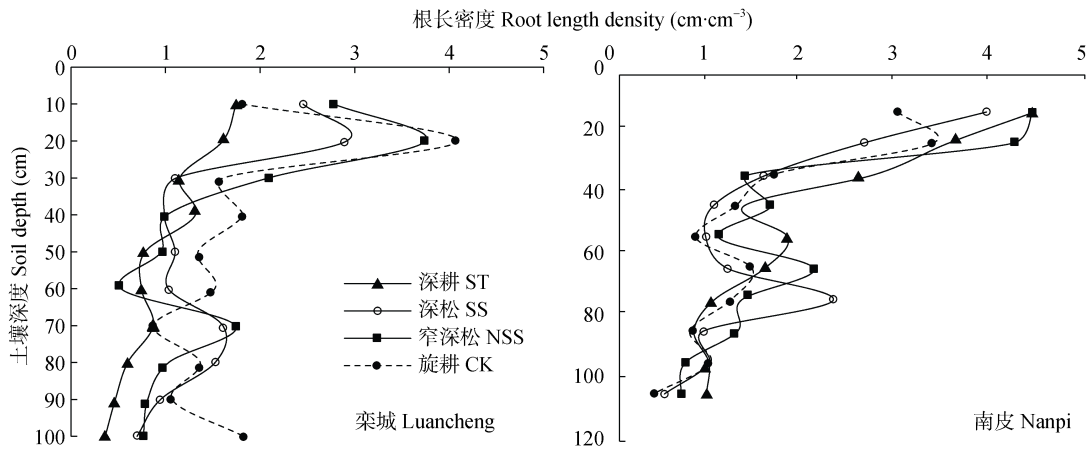


图 4 耕作方式对栾城试验区和南皮试验区冬小麦收获期根长密度的影响

Fig. 4 Effects of tillage patterns on root length densities of winter wheat at harvest at Luancheng experiment site and Nanpi experiment site

CK: rotary tillage; DT: deep tillage; SS: subsoiling; NSS: narrow subsoiling.

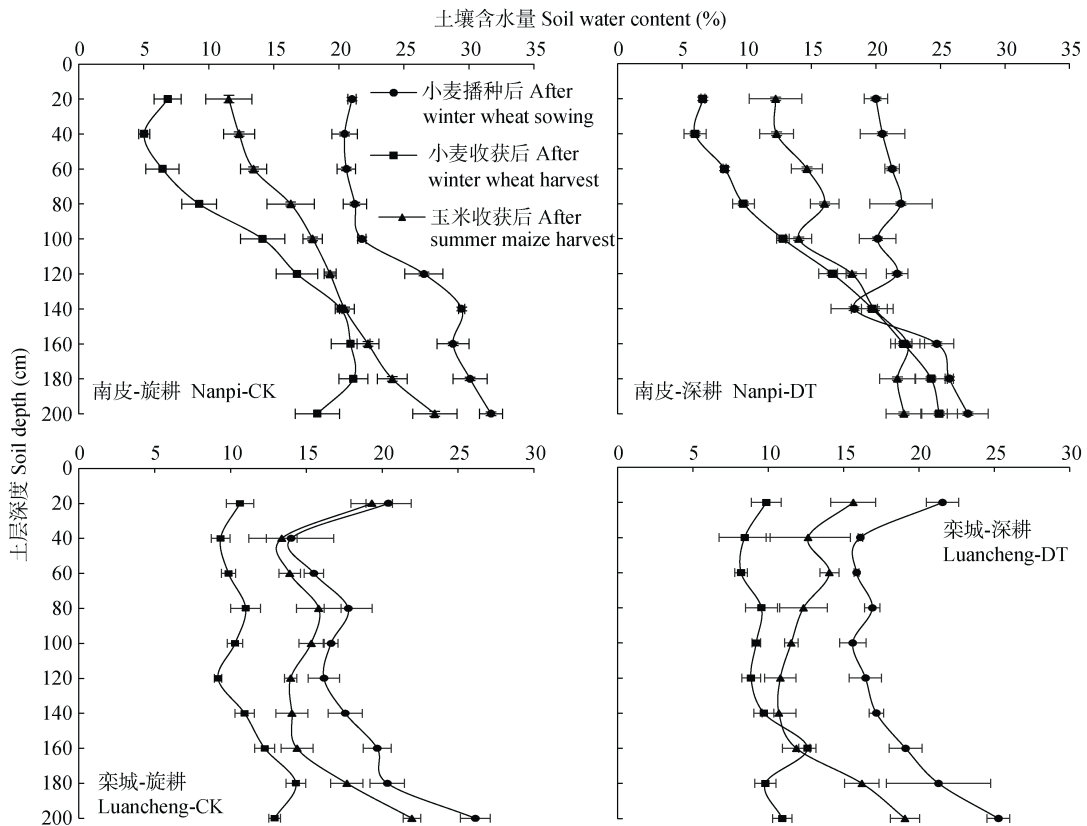


图 5 旋耕和深耕处理下南皮试验区和栾城试验区不同时间土壤含水量的变化

Fig. 5 Changes of soil water contents (W/W) during the experiment at Nanpi experiment site and Luancheng experiment site under rotary tillage (CK) and deep tillage (DT)

在南皮试验区, 深耕(松)处理显著增加了冬小麦和夏玉米的水分利用效率(表 3)。与 CK 相比, 深耕、深松和窄深松处理使冬小麦的水分利用效率分别提高 27.8%、23.8%和 25.8%, 夏玉米的水分利用

效率分别提高 14.1%、11.6%和 18.7%, 周年水分利用效率分别提高 20.1%、17.2%和 22.4%, 与 CK 处理均达到显著水平($P < 0.05$)。在栾城试验区, 深耕(松)处理对冬小麦和夏玉米水分利用效率的影响不显著。

表 3 不同耕作方式对南皮试验区和栾城试验区冬小麦和夏玉米水分利用效率的影响
Table 3 Effects of tillage patterns on water use efficiency of winter wheat and summer maize at Nanpi experiment site and Luancheng experiment site $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

处理 Treatment	南皮试验区 Nanpi experiment site			栾城试验区 Luancheng experiment site		
	冬小麦	夏玉米	周年	冬小麦	夏玉米	周年
	Winter wheat	Summer maize	Whole year	Winter wheat	Summer maize	Whole year
深耕 Deep tillage	1.93±0.03a	2.26±0.08a	2.09±0.05a	1.82±0.05a	2.64±0.06a	2.21±0.05a
深松 Subsoiling	1.87±0.04a	2.21±0.07a	2.04±0.06a	1.84±0.06a	2.43±0.07a	2.11±0.04a
窄深松 Narrow subsoiling	1.90±0.03a	2.35±0.10a	2.13±0.05a	1.96±0.06a	2.63±0.05a	2.30±0.05a
旋耕 Rotary tillage (CK)	1.51±0.05b	1.98±0.11b	1.74±0.07b	1.90±0.04a	2.48±0.05a	2.17±0.04a

同列不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。Different lowercase letters in the same column mean significant differences among treatments at 0.05 level.

2.5 耕作方式对冬小麦和夏玉米产量及产量构成因素的影响

对长期秸秆还田和土壤旋耕的农田,冬小麦播种前进行土壤深耕和深松处理,两个试验区域对冬小麦和夏玉米产量的影响不同(表 4)。

南皮试验区不同耕作方式对冬小麦和夏玉米均具有增产效应,夏玉米的增产效应稍高于冬小麦。深耕、深松和窄深松处理冬小麦产量分别比 CK 显著增加 16.5%、19.3%和 13.1%($P<0.05$),但深耕、深松和窄深松处理间差异不显著。土壤耕作方式对夏玉米产量也具有显著($P<0.05$)增产作用,深耕、深松和窄深松处理分别比 CK 增产 17.3%、16.2%和 21.9%。深松和深耕均提高了夏玉米的穗数,深耕、深松和窄深松处理穗数分别比 CK 提高 8.0%、6.2%

和 21.8%,窄深松处理与 CK 差异显著。与 CK 相比不同耕作处理夏玉米千粒重差异不显著。

栾城试验区不同土壤耕作方式对冬小麦和夏玉米的增产效应不显著。窄深松处理的冬小麦产量最高,比 CK 增产 7.6%,深耕、深松和 CK 之间产量差异不显著,与窄深松产量差异显著($P<0.05$)。土壤深耕松对玉米产量的增产效果不显著。深耕、深松和窄深松与 CK 处理的夏玉米产量差异不显著。深耕和窄深松均提高了夏玉米的穗数($P<0.05$),分别比 CK 提高 17.9%和 14.5%,深松处理的穗数高于 CK,差异不显著。

南皮试验区土壤深耕、深松和窄深松的周年产量分别比 CK 显著($P<0.05$)提高 16.9%、17.6%和 17.8%;栾城试验区增产不显著。

表 4 不同耕作处理对冬小麦和夏玉米产量及产量构成的影响

Table 4 Grain yield and yield components of winter wheat, summer maize and whole year under different soil tillage treatments

试验区 Experiment site	处理 Treatment	冬小麦 Winter wheat				夏玉米 Summer maize				周年产量 Annual yield ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)
		产量	穗数	穗粒数	千粒重	产量	穗数	穗粒数	千粒重	
		Grain yield ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	Spike number (m^{-2})	Grains per spike	1000-grain weight (g)	Grain yield ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	Spike number (m^{-2})	Grains per ear	1000-grain weight (g)	
南皮 Nanpi	CK	6.42±0.52b	535.8±35.74b	34.4±1.01a	38.0±0.74c	7.63±0.36b	5.10±0.15b	517.2±9.55a	367.8±4.43a	14.05±0.39b
	DT	7.48±0.73a	672.9±95.16a	34.1±1.79a	39.2±2.14bc	8.95±0.49a	5.51±0.62b	477.2±32.08b	370.2±8.77a	16.43±0.37a
	SS	7.66±0.51a	535.4±53.72b	34.0±2.69a	42.3±1.88a	8.87±0.87a	5.41±0.81b	496.9±28.71ab	367.0±11.10a	16.53±1.03a
	NSS	7.26±1.00a	577.1±35.74b	30.4±2.93b	40.8±1.59ab	9.29±0.76a	6.21±0.81a	479.8±34.52b	375.8±14.31a	16.56±1.17a
栾城 Luancheng	CK	6.74±0.19ab	757.5±41.49a	28.0±2.84b	40.1±0.39a	8.90±0.95a	5.58±0.26b	512.2±19.66a	338.7±9.71a	15.64±1.07a
	DT	6.51±0.38b	631.7±75.30ab	30.3±3.16b	37.3±1.22b	9.46±0.23a	6.58±0.38a	508.1±14.53a	327.3±18.35ab	15.96±0.51a
	SS	6.52±0.27b	578.3±107.990b	32.8±1.87a	40.6±0.62a	8.68±0.32a	5.80±0.35b	482.5±20.67ab	316.8±12.00b	15.20±0.59a
	NSS	7.26±0.32a	706.7±74.04ab	30.0±2.79b	40.2±0.66a	8.75±0.57a	6.39±0.43a	458.3±26.20b	326.4±3.20ab	16.01±0.88a

CK: 常规旋耕; DT: 深耕; SS: 深松; NSS: 窄深松。同列同一试验区不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著。CK: rotary tillage; DT: deep tillage; SS: subsoiling; NSS: narrow subsoiling. Different lowercase letters in the same column for the same experiment site mean significant differences among treatments at 0.05 level.

3 结论与讨论

3.1 讨论

研究结果表明,针对华北平原冬小麦-夏玉米一年两熟制长期单一旋耕和免耕的农田,在冬小麦播

种前进行深耕(松)处理不仅提高了当季冬小麦的产量,对下茬夏玉米也具有增产作用,这与其他同类型地区的研究结果一致^[9,25]。但是耕作方式有区域适应性,土壤耕作对产量的效应受土壤、气候等环境因子等影响,在不同区域的增产效应不同^[26]。李永

平等^[27]研究发现, 深耕和深松处理比常规旋耕分别提高玉米产量 20.4%和 3.7%; 梁金凤等^[28]研究不同耕作方式对土壤理化性状及玉米根系生长和产量的影响, 发现耕作方式对玉米的产量无显著影响。本研究 2 个试验区的不同耕作方式对产量的影响也不相同。南皮试验区, 深耕(松)对冬小麦和夏玉米的增产效应均达显著水平($P < 0.05$), 栾城试验区深耕(松)处理的冬小麦和夏玉米产量与常规旋耕(CK)的差异不显著, 增产效应不显著。南皮试区和栾城试区的差异表现在以下几个方面:

1) 耕作方式对土壤容重和作物根系的影响。与栾城试验区相比, 南皮试验区的土壤肥力较低。0~20 cm 和 20~40 cm 土壤有机质比栾城试验区分别低 47.2%和 44.8%, 全氮低 34.1%和 58.3%, 速效氮低 63.6%和 70.9%, 速效钾低 5.1%和 25.3%; 仅速效磷含量南皮试验区高于栾城试验区, 0~20 cm 和 20~40 cm 土层分别高 34.7%和 34.4%。在土壤肥力较低的情况下, 土壤深松和深耕显著降低了土壤紧实度和土壤容重, 促进了作物根系的生长和作物产量, 深耕、深松和窄深松的作物产量异不显著, 但与常规旋耕之间差异显著。栾城试验区由于长期采用喷灌灌溉, 1~2 m 土壤含水量难以得到补充, 深层土壤含水量较低, 虽然促进了冬小麦下层根系的生长, 但是生育后期土壤水分供应不足, 影响根系吸水 and 产量提升。

2) 土壤水分条件和水分利用效率。冬小麦生育期降雨量不能满足其生长发育的需求, 并且随着水资源日益短缺, 华北平原区的栾城和南皮试验区冬小麦生产均采取了调亏灌溉, 因此, 生育期的土壤水分供应能力对冬小麦稳产和高产起决定作用。南皮试验区冬小麦生育期土壤水分含量高于栾城试验区, 尤其是冬小麦生育后期, 深层土壤水分高低对冬小麦的灌浆具有重要作用。南皮试验区冬小麦生育期深耕、深松、窄深松和旋耕(CK)的土壤耗水分别为 169.1 mm、177.3 mm、150.4 mm 和 194.7 mm, CK 的土壤耗水量最高, 但处理间差异不显著。在深(松)耕处理增产的前提下, 水分利用效率也相应提高, 与 CK 间达到显著水平。栾城试验区处理间的土壤耗水和产量均没有差异, 最终水分利用效率差异也不显著。

从不同土壤耕作方式的作业过程和动力消耗来看, 深耕、深松的作业程序和动力消耗基本相同, 深耕或者深松后进行旋耕播种, 窄深松则相当于深耕 2 次进行旋耕后播种, 动力消耗较高, 深耕、深松和窄深松对土壤特性和作物产量的影响之间差异不显

著。因此, 生产上不推荐使用窄深松。

3.2 结论

本研究结果表明, 针对华北平原冬小麦-夏玉米一年两熟种植中长期采用单一土壤旋耕和免耕农田, 实施土壤深耕、深松和窄深松处理对作物产量的影响不同。在代表华北平原高产区域土壤深耕(松)对冬小麦、夏玉米和全年产量的增产效应不显著, 可以继续实施土壤旋耕作业。但中低产区域土壤深耕(松)多少年后对降低作物产量和高产区域需要不需要进行土壤深耕(松)需要做进一步研究。

参考文献 References

- [1] 杜章留, 高伟达, 陈素英, 等. 保护性耕作对太行山前平原土壤质量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1134-1142
DU Z L, GAO W D, CHEN S Y, et al. Effect of conservation tillage on soil quality in the piedmont plain of Mount Taihang[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1134-1142
- [2] BECERRA A T, BOTTA G F, BRAVO X L, et al. Soil compaction distribution under tractor traffic in almond (*Prunus amygdalus* L.) orchard in Almería España[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 107(1): 49-56
- [3] BENGOUGH A G, MCKENZIE B M, HALLETT P D, et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(1): 59-68
- [4] LIPIEC J, HATANO R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth[J]. Geoderma, 2003, 116(1/2): 107-136
- [5] 李潮海, 李胜利, 王群, 等. 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
LI C H, LI S L, WANG Q, et al. A study on corn root growth and activities at different soil layers with special bulk density[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(8): 1706-1711
- [6] VAN DEN AKKER J J H, ARVIDSSON J, HORN R. Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union[J]. Soil and Tillage Research, 2003, 73(1/2): 1-8
- [7] POWERS R F, ANDREW SCOTT D, SANCHEZ F G, et al. The North American long-term soil productivity experiment: Findings from the first decade of research[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 220(1/2/3): 31-50
- [8] 谢迎新, 靳海洋, 孟庆阳, 等. 深耕改善砂姜黑土理化性状提高小麦产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 167-173
XIE Y X, JIN H Y, MENG Q Y, et al. Deep tillage improving physical and chemical properties of soil and increasing grain yield of winter wheat in lime concretion black soil farmland[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 167-173
- [9] 赵亚丽, 刘卫玲, 程思贤, 等. 深松(耕)方式对砂姜黑土层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科

- 学, 2018, 51(13): 2489–2503
ZHAO Y L, LIU W L, CHENG S X, et al. Effects of pattern of deep tillage on topsoil features, yield and water use efficiency in lime concretion black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(13): 2489–2503
- [10] 李霞. 小麦-玉米周年生产体系中播前耕作对夏玉米产量及生理特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014
LI X. Effect of pre-planting tillage of winter wheat and summer maize on yield and physiological characteristics of summer maize[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014
- [11] 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
KONG X M, HAN C W, ZENG S M, et al. Effects of different tillage managements on soil physical properties and maize yield[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22(1): 108–113
- [12] 杨永辉, 武继承, 张洁梅, 等. 耕作方式对土壤水分入渗、有机碳含量及土壤结构的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(2): 258–266
YANG Y H, WU J C, ZHANG J M, et al. Effect of tillage method on soil water infiltration, organic carbon content and structure[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(2): 258–266
- [13] 刘卫玲, 程思贤, 周金龙, 等. 深松(耕)时机与方式对土壤物理性状和玉米产量的影响[J]. *河南农业科学*, 2018, 47(3): 7–13
LIU W L, CHENG S X, ZHOU J L, et al. Effects of time and pattern of deep tillage (subsoiling) on soil physical properties and maize yield[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2018, 47(3): 7–13
- [14] 于淑婷, 赵亚丽, 王育红, 等. 轮耕模式对黄淮海冬小麦-夏玉米两熟区农田土壤改良效应[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(11): 2150–2165
YU S T, ZHAO Y L, WANG Y H, et al. Improvement effects of rotational tillage patterns on soil in the winter wheat-summer maize double cropping area of Huang-Huai-Hai region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2150–2165
- [15] 谢迎新, 靳海洋, 孟庆阳, 等. 深耕改善砂姜黑土理化性状提高小麦产量[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 167–173
XIE Y X, JIN H Y, MENG Q Y, et al. Deep tillage improving physical and chemical properties of soil and increasing grain yield of winter wheat in lime concretion black soil farmland[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(10): 167–173
- [16] 赵俊靖, 李洪奎, 李华春, 等. 深耕对小麦病虫害的防治效果[J]. *植物医生*, 2017, 30(11): 51–53
ZHAO J J, LI H K, LI H C, et al. Effects of deep tillage on wheat diseases and insect pests[J]. *Plant Doctor*, 2017, 30(11): 51–53
- [17] 雷友, 曹国鑫, 牛新胜, 等. 土壤深耕对冬小麦根系在土壤剖面分布的影响[J]. *现代农业科技*, 2011(8): 272–273
LEI Y, CAO G X, NIU X S, et al. Influence of deep tillage on distribution of wheat root system in soil profile[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2011(8): 272–273
- [18] 宫秀杰, 钱春荣, 于洋, 等. 深松免耕技术对土壤物理性状及玉米产量的影响[J]. *玉米科学*, 2009, 17(5): 134–137
GONG X J, QIAN C R, YU Y, et al. Effects of subsoiling and No-tillage on soil physical characters and corn yield[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2009, 17(5): 134–137
- [19] 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, 2(5): 297–307
- [20] ZHANG Y C, SHEN Y J, SUN H Y, et al. Evapotranspiration and its partitioning in an irrigated winter wheat field: A combined isotopic and micrometeorologic approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 408(3/4): 203–211
- [21] LIU X W, FEIKE T, CHEN S Y, et al. Effects of saline irrigation on soil salt accumulation and grain yield in the winter wheat-summer maize double cropping system in the low plain of North China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(12): 2886–2898
- [22] 吕梦宇, 王仕琴, 齐永青, 等. 华北低平原区降水与坑塘蓄水响应关系研究——以河北省南皮县为例[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(10): 1796–1805
LYU M Y, WANG S Q, QI Y Q, et al. Study on the relationship between precipitation and pond water storage in lowland area of North China Plain — A case study in Nanpi County, Hebei Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(10): 1796–1805
- [23] 孙宏勇, 刘小京, 张喜英. 盐碱地水盐调控研究[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(10): 1528–1536
SUN H Y, LIU X J, ZHANG X Y. Regulations of salt and water of saline-alkali soil: A review[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(10): 1528–1536
- [24] ZHANG X Y, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Changes in evapotranspiration over irrigated winter wheat and maize in North China Plain over three decades[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 1097–1104
- [25] 王群, 王建, 张学林, 等. 不同耕作模式下小麦玉米周年生产及土壤养分变化特征[J]. *河南农业大学学报*, 2015, 49(4): 429–437
WANG Q, WANG J, ZHANG X L, et al. Change characteristics of wheat and maize anniversary production and soil nutrient content under different rotation tillage patterns[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2015, 49(4): 429–437
- [26] TOLIVER D K, LARSON J A, ROBERTS R K, et al. Effects of no-till on yields as influenced by crop and environmental factors[J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(2): 530
- [27] 李永平, 王孟本, 史向远, 等. 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
LI Y P, WANG M B, SHI X Y, et al. Influence of different tillage methods on soil physical and chemical properties and maize yield[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2012, 40(7): 723–727
- [28] 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
LIANG J F, QI Q Z, JIA X H, et al. Effects of different tillage managements on soil properties and corn growth[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 945–950