doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.029

深松处理对豫北农田土壤水分与作物耗水的影响

张　凯[1]　刘战东[1]　强小嫚[1]　米兆荣[2]　冯荣成[3]　孙景生[1]

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所农业农村部作物需水与调控重点开放实验室, 新乡 453002;
2. 河南科技学院园艺园林学院, 新乡 453003; 3. 获嘉县农业技术推广中心, 新乡 453800)

摘要: 为探索豫北潮土区冬小麦-夏玉米周年复种连作合理的深松技术指标,于 2017—2018 年在河南省获嘉县冬小麦播种前进行深松田间试验。采用 2 种深松机具(T,传统深松机;A,深松 + 施肥一体机),在传统深松机(T)上设置 3 个深松深度(D1,30 cm;D2,35 cm;D3,40 cm)和深松 + 施肥一体机(A)上设置 1 个深松深度(D2,35 cm),同时以常规旋耕(CK,平均耕作深度为 15 cm)为对照,通过测定土壤容重、作物生育期内不同时间段的土壤含水率以及作物收获后的产量和产量性状,分析各深松处理对作物产量和水分利用效率的影响。结果表明,深松方式能够改变土壤容重,显著降低豫北农田 10 ~ 30 cm 土层的土壤容重。不同深松处理可以显著影响土壤含水率,增加田间蓄水能力,周年 0 ~ 100 cm 土层贮水量两季作物不同处理由大到小依次为 TD2、TD1、TD3、AD2、CK,且各处理较旋耕对照依次分别显著增加 34.9%、28.9%、28.5%、27.0%($p < 0.05$)。深松处理还可以显著增加作物的穗数和穗粒数,提高作物产量,各处理两季产量较旋耕对照平均增加 8.3%,且冬小麦的增产效应大于夏玉米。同时,深松还能较大幅度地提高冬小麦-夏玉米复种体系作物的水分利用效率,深松处理两季较旋耕对照平均提高 12.4%,并显著降低了作物的耗水量和耗水强度,其中以传统深松机深松 40 cm 处理的效果最优。因此,在冬小麦播种前深松,有利于土壤耕层合理构建,并提高作物产量和水分利用效率,对以旱作冬小麦-夏玉米复种体系为主的豫北地区有很高的推广价值。

关键词: 豫北; 深松; 土壤容重; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S222.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)10-0251-08

Effects of Subsoiling on Soil Moisture and Crop Water Consumption in Farmland of Northern Henan Province

ZHANG Kai[1]　LIU Zhandong[1]　QIANG Xiaoman[1]　MI Zhaorong[2]　FENG Rongcheng[3]　SUN Jingsheng[1]

(1. *Key Laboratory for Crop Water Requirement and Its Regulation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang* 453002, *China*
2. *School of Horticulture and Landscape Architecture, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang* 453003, *China*
3. *Huojia County Agricultural Technology Extension Center, Xinxiang* 453800, *China*)

Abstract: The object was to explore the reasonable technical index of subsoiling for the annual double cropping of winter wheat-summer maize in meadow soil of northern Henan Province. In 2017—2018, based on the data of field experiment, the subsoiling was conducted before sowing winter wheat in Huojia County of Henan Province. The experimental design used two kinds of subsoiling machine (T, traditional subsoiling machine; A, subsoiling + fertilization integrated machine) and three depths (D1, 30 cm; D2, 35 cm and D3, 40 cm) were set on the traditional subsoiling machine and a deep depth (D2, 35 cm) on subsoiling + fertilizer integrated machine, meanwhile, the conventional rotary tillage (CK, average tillage depth of 15 cm) was used as a control. The variations of crop yield and water use efficiency of each subsoiling treatment were analyzed by measuring soil bulk density, soil water content and crop yield and yield traits. The result showed that the subsoiling method could change the soil bulk density, and the soil bulk density in 10 ~ 30 cm soil layer was significantly reduced ($p < 0.05$). Subsoiling treatments also had a significant impact on soil water content, which could increase the water storage capacity in field ($p <$

收稿日期: 2019-06-22　修回日期: 2019-08-16

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503117)和中央科研院所基本科研业务费专项资金项目(FIRI2018-05、FIRI2017-09)

作者简介: 张凯(1987—),男,助理研究员,博士,主要从事农田耕作与水分高效利用研究,E-mail: zhangkai4221@foxmail.com

通信作者: 孙景生(1963—),男,研究员,博士,主要从事作物生理与水分高效利用研究,E-mail: jshsun623@163.com

0.05). During the annual two-season crops, the water storage capacity of soil in 0 ~ 100 cm soil layer in descending order was TD2, TD1, TD3, AD2 and CK. Compared with the water storage capacity of rotary tillage, that of the subsoiling treatments was increased significantly by 34.9%, 28.9%, 28.5% and 27.0% ($p < 0.05$), respectively. Subsoiling treatments also could significantly increase the number of spikes and kernels of crops, and increase the yield of crops ($p < 0.05$). The yield of subsoiling treatments were averagely increased by 8.3% in two-season crops compared with the rotary tillage, and the effect of increasing yield of winter wheat was greater than that of summer maize. At the same time, subsoiling could also greatly improve the water use efficiency (WUE) of the crops in the winter wheat-summer maize multiple cropping system, and significantly reduce water consumption and water consumption intensity of crops ($p < 0.05$). The WUE of subsoiling treatments was averagely increased by 12.4% compared with that of the rotary tillage, among which AD2 had the best effect. Therefore, subsoiling before the sowing of winter wheat was conducive to the rational construction of soil tillage layer, which improved crop yield and water use efficiency. It had a high promotion value for the dry farming wheat-maize multiple cropping system of northern Henan Province.

Key words: northern Henan Province; subsoiling; soil bulk density; yield; water use efficiency

0 引言

豫北地处华北平原南部,是我国重要的粮食产区,以冬小麦和夏玉米复种连作为主要种植模式,也是我国水浇地主要分布区之一[1-3]。长期农业生产实践中,采用旋耕整地加地面灌溉的农作方式导致土壤耕层变浅、犁底层加厚,耕层结构变化导致土壤协调水肥气热的功能弱化[4]。同时,作物根系分布浅层化,对土壤水分和养分的吸收受到限制[5],致使土壤性能不断退化,严重制约粮食作物产量的提高。当前,该区域农业生产与农田土壤水分密切相关,如何在适宜的耕作方式下合理、高效地利用土壤水分,从而提高粮食产量已成为该区域亟需解决的科学问题。

已有研究表明,通过耕作方式构建合理耕层结构,是改善作物对水分和养分利用效率[6]、提升土壤生产能力的一种重要途径[7]。深松方式能够有效打破传统旋耕产生的犁底层,可以为作物生长创造适宜的耕层环境,促进作物生长和产量提高[8-10]。当前,我国为改善农田耕地质量、全面提高农业综合生产能力,实现“藏粮于地、藏粮于技”,提出要大力推进农机深松整地作业[11-14]。现有研究大多针对单一深松机械条件下深松深度对作物生长的影响,且注重作物产量对深松技术的响应[4,15],而针对不同深松机械下农田土壤水分状况和作物生长对深松技术响应的研究较少。本文通过采用不同深松机械与深松深度的方式,研究深松耕作方式对冬小麦-夏玉米一年两熟制农田土壤物理性状和土壤蓄水能力以及作物产量和水分利用效率的影响,以期为优化豫北地区适宜耕层结构乃至华北平原合理耕作方式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2017—2018 年在豫北新乡市获嘉县(35.29°N、113.64°E,海拔 78 m)进行,该区多年平均气温 14.6℃,无霜期 221 d,日照时数 2 058.4 h,光热资源丰富,以一年两熟(冬小麦-夏玉米)种植制度为主;多年平均降雨量为 557.2 mm。冬小麦播种日期为 2017 年 10 月 27 日,收获日期为 2018 年 6 月 1 日,全生育期降雨量共计 185.9 mm,如图 1 所示。夏玉米播种日期为 2018 年 6 月 5 日,收获日期为 2018 年 9 月 29 日,全生育期降雨总量达 285.0 mm。该区域是典型潮土分布区,试验地土质为砂壤土,0 ~ 100 cm 土壤容重为 1.45 g/cm^3,冬小麦播种前土壤基础肥力中有机质质量比 13.4 g/kg,碱解氮质量比 72.61 mg/kg,速效磷质量比 9.74 mg/kg,速效钾质量比 108.65 mg/kg,地下水埋深大于 5 m。

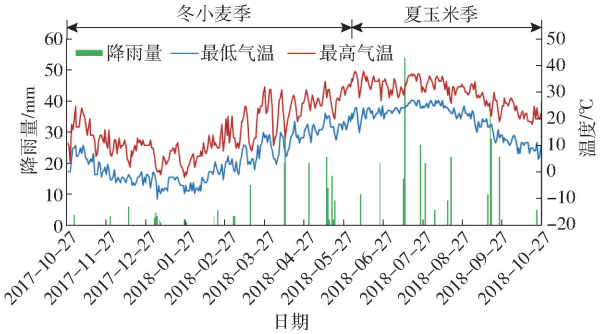


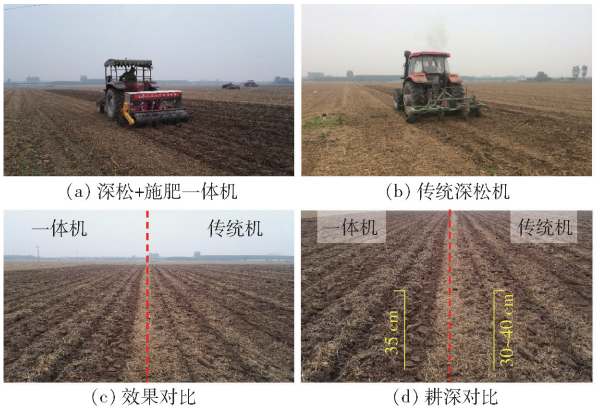
图 1 2017—2018 年冬小麦-夏玉米生育期温度和降雨量分布

Fig. 1 Distribution of temperature and rainfall during winter wheat-summer maize growth period in 2017—2018

1.2 试验设计

试验以常规旋耕(CK)为对照,传统深松机(T)设置 3 个深松深度 30 cm(TD1)、35 cm(TD2)、40 cm

(TD3)和深松 + 施肥一体机(A)深度 35 cm(AD2)5 个处理(图 2),3 次重复,共计 15 个小区随机排列,所有耕作处理均在冬小麦播种前进行,夏玉米季不进行耕作处理。试验区内每畦长 50 m,宽 3.4 m,畦埂宽 30 cm,埂高 20 cm,面积 170 m^2。2017 年供试冬小麦为"百农 2017",属半冬性中晚熟品种,播种量为 225 kg/hm^2。肥料施用量为:N 180 kg/hm^2、P_2O_5 90 kg/hm^2和 K_2O 90 kg/hm^2,于整地前作为底肥一次性施入,拔节期追施 N 75 kg/hm^2。2018 年夏玉米品种为"金诚 6 号",种植密度 67 500 株/hm^2,种肥同播,播种时同时施入玉米复合肥 50 kg(N、P、K 施肥量比例为 29∶6∶5),即 N 217.5 kg/hm^2、P_2O_5 45 kg/hm^2和 K_2O 37.5 kg/hm^2。灌水方式为常规畦灌,冬小麦季灌水量控制在 225 mm,夏玉米季灌水量在 150 mm。试验区周围设有保护行,其他农事管理措施一致。



(a) 深松+施肥一体机　(b) 传统深松机　(c) 效果对比　(d) 耕深对比

图 2　2017 年冬小麦播种前深松整地处理

Fig. 2　Subsoiling before sowing winter wheat in 2017

1.3　测定项目与方法

1.3.1　土壤容重

采用土壤容重钻测定 0 ~ 40 cm 土层深度的容重,每 10 cm 为一个土层,每个处理 3 次重复。

1.3.2　土壤贮水量

采用取土干燥法测定,各处理每 7 ~ 10 d 测定 1 次,测定深度为 100 cm,每 20 cm 土层取样,先称湿土质量,在 105℃恒温下干燥 8 h 后称干土质量。对各处理进行 3 次平行测定,取平均值,计算土壤质量含水率。同时,根据土壤质量含水率计算各个生育时期的土壤贮水量。

土壤贮水量及土壤质量含水率计算式为[16]

$$W = 10w\rho h \tag{1}$$

其中

$$w = (w_a - w_b)/w_b \tag{2}$$

式中　W——土壤贮水量,mm

ρ——土壤容重,g/cm^3

h——土层厚度,cm

w——土壤质量含水率,g/g

w_a——鲜土质量,g

w_b——干燥土质量,g

1.3.3　作物产量

在成熟期,冬小麦每个小区随机选取 2 m^2(1 m × 2 m)为样本,夏玉米每小区选取 14 m^2(相邻两行连续 10 m)为样本,籽粒经自然风干后称量,换算成公顷产量。

1.3.4　水分利用效率

采用水分平衡法计算作物农田耗水量[17]

$$ET = P - R - F - S_W \tag{3}$$

式中　ET——耗水量,mm

P——降水量,mm

R——径流量,mm

F——深层渗漏量,mm

S_W——生育期末与生育期初土壤贮水量之差,mm

试验地区为潮土,疏松多孔,再加上试验地平整,地表径流小;在有作物生长的农田,多雨年份降水入渗深度不超过 2 m,所以 R 和 F 可忽略不计。因此式(3)可化简为

$$ET = P - S_W \tag{4}$$

水分利用效率计算式为

$$WUE = Y/ET \tag{5}$$

式中　WUE——水分利用效率,kg/(hm^2·mm)

Y——籽粒产量,kg/hm^2

1.4　数据分析

采用 SPSS 22.0 软件 One way ANOVA 分析不同耕作处理之间的差异显著性并采用 Duncan 新复极差法(SSR)进行多重比较,显著水平取 $p < 0.05$。利用 Excel 2013 软件进行数据处理分析,OriginPro 2019 软件制图。

2　结果与分析

2.1　深松处理对农田土壤容重的影响

由图 3(图中不同小写字母表示各处理在 $p < 0.05$ 水平上显著)可以看出,通过不同深松机具和深松深度处理,两季作物成熟期土壤容重各处理在 10 ~ 30 cm 土层较旋耕对照差异显著($p < 0.05$)。冬小麦收获后,0 ~ 10 cm 土层容重仅在传统深松机深松深度 30 cm 处理下显著低于其他各处理;10 ~ 20 cm 土层传统深松机在深松深度 30 cm 和 35 cm 处理较对照土壤容重显著降低,分别降低 6.21% 和 3.29%($p < 0.05$),其他深松处理与对照之间的差异不显著;20 ~ 30 cm 土层传统深松机在深松深度 35 cm 和 40 cm 处理较对照土壤容重显著降低,分别降低 2.32% 和 7.05%,同时深松深度在 40 cm 处理

容重又显著低于 35 cm 处理($p<0.05$),其他各处理之间差异未达显著水平;30 ~ 40 cm 土层深松处理土壤容重均低于对照处理,但处理之间差异均不显著($p>0.05$)。夏玉米收获后,0 ~ 40 cm 土层土壤容重仅传统机深松深度 40 cm 处理在 10 ~ 30 cm 土层显著低于其他各处理,0 ~ 10 cm 和 30 ~ 40 cm 土层各处理之间差异不显著($p>0.05$)。

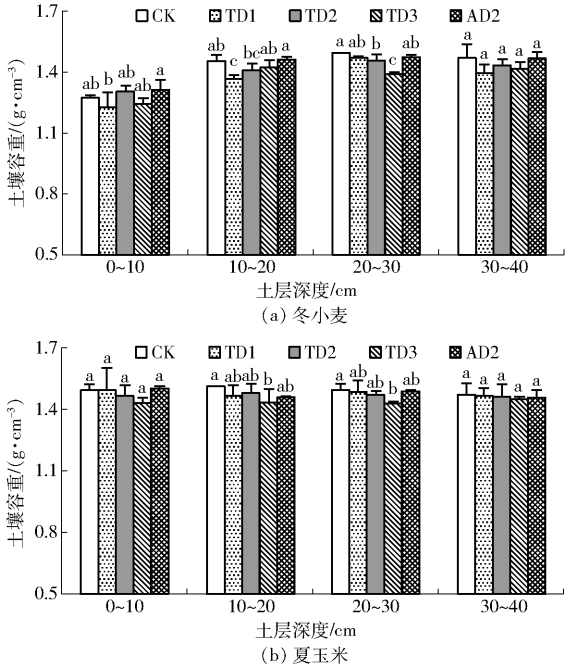


图 3 冬小麦-夏玉米复种体系作物收获后不同深度土层土壤容重

Fig. 3 Soil bulk density of different depths after harvest in winter wheat-summer maize multiple cropping system

2.2 深松处理对农田土壤水分分布的影响

在冬小麦-夏玉米复种体系作物的整个生育期,不同处理土壤水分分布情况如图 4 所示。从图中可以看出,当灌溉和降雨发生时,通过深松处理的土壤贮水量深度较对照处理更深;同时,在冬小麦灌浆期,作物对土壤水分的需求量相对较低,加之该时间段天气炎热,因此该阶段土壤贮水量较低,该试验 40 cm 以下土层的贮水量各深松处理均高于对照,其中传统深松机械在深松深度 35 cm 处理该时期土壤贮水量高于其他处理。图中还可以直观看出,灌水后深松处理的水分能够向更深层的土壤运移,这样能够增加深层土壤水分的蓄积,这对冬小麦和夏玉米生育期对土壤水分的吸收较为有利。整体上,深松处理能够增加冬小麦-夏玉米连作 0 ~ 100 cm 土层贮水量,TD1、TD2、TD3、AD2 处理较旋耕对照 CK 处理 0 ~ 100 cm 土层贮水量冬小麦季分别增加 11.2%、20.6%、13.4%、6.2%;夏玉米季分别增加 17.7%、14.3%、15.1%、20.8%。此外,深松与旋耕方式相比,主要对土壤 40 cm 以下土层的土壤水分变化产生影响。同时,土壤深松深度的增加还有利于提高深层土壤水分的蓄积。

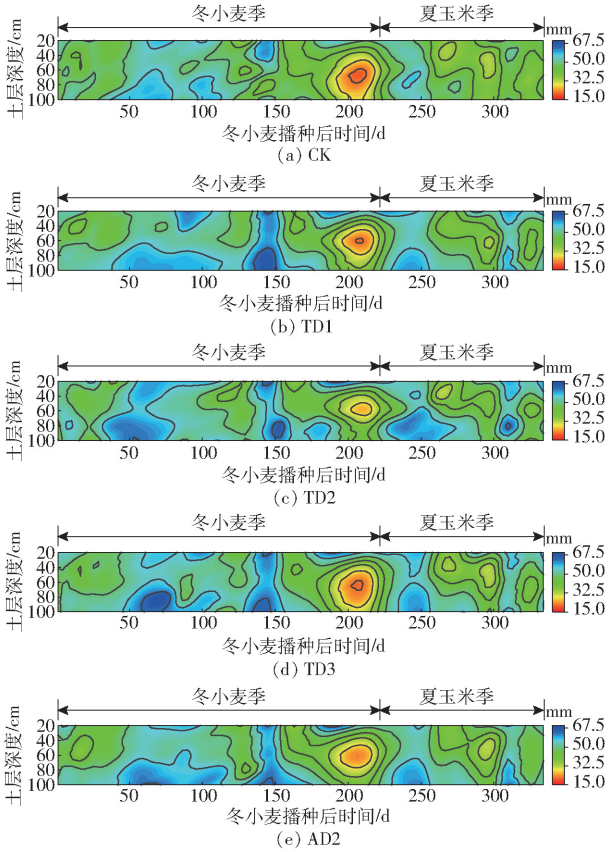


图 4 冬小麦播种后土壤贮水量变化

Fig. 4 Changes in soil water storage after winter wheat sowing

2.3 深松处理对作物产量及产量性状的影响

深松机具和深松深度对冬小麦、夏玉米产量和产量性状的影响显著(表 1),深松处理作物产量整体较旋耕对照显著增加($p<0.05$)。冬小麦产量由大到小各处理顺序为 TD3、TD2、TD1、AD2、CK,其中传统深松机深松深度 40 cm 处理产量较旋耕处理增产 16.0%,且显著高于其他处理;传统深松机深松深度 30、35 cm 和深松 + 施肥一体机深松深度 35 cm 处理较旋耕对照分别显著增产 9.2%、8.4%、12.3%($p<0.05$);夏玉米产量由大到小各处理顺序为 AD2、TD2、TD3、TD1、CK,其中深松处理产量均显著高于旋耕对照,分别增产 10.9%、9.6%、9.1%、4.2%($p<0.05$)。产量性状方面,冬小麦穗数和穗粒数均以传统深松机深松深度 40 cm 处理最高,显著高于旋耕对照,但与其他深松处理之间差异不显著;千粒质量则表现为所有处理之间差异均未达显著水平($p>0.05$)。夏玉米穗数和穗粒数方面,则分别以传统深松机深松深度 35 cm 和 30 cm 处理最高,且显著高于旋耕对照;穗数方面各处理与冬小麦趋势一致;但穗粒数传统深松机不同深松深度处理均显著高于深松 + 施肥一体机处理,且各深

松处理均显著高于旋耕对照；百粒质量方面同样表现为各处理之间没有显著差异（$p>0.05$）。从上述结果可以看出，深松处理可以显著提高作物产量，且对冬小麦的增产效应大于夏玉米。

表 1　冬小麦–夏玉米复种体系不同深松处理作物产量与产量性状

Tab. 1　Yield and yield components of winter wheat-summer maize multiple cropping system with different subsoiling treatments

处理	冬小麦				夏玉米			
	穗数/个	穗粒数/个	千粒质量/g	产量/(kg·hm^{-2})	穗数/个	穗粒数/个	百粒质量/g	产量/(kg·hm^{-2})
CK	3.71×10^{5b}	35.8^{b}	45.2^{a}	$6\,670.5^{c}$	$3\,870.6^{b}$	568.7^{c}	32.7^{a}	$8\,761.5^{b}$
TD1	4.41×10^{5ab}	38.6^{ab}	44.6^{a}	$7\,087.5^{b}$	$4\,123.0^{ab}$	670.5^{a}	32.2^{a}	$9\,127.5^{ab}$
TD2	3.98×10^{5ab}	40.0^{a}	43.9^{a}	$7\,137.0^{b}$	$4\,231.1^{a}$	592.8^{bc}	32.7^{a}	$9\,601.5^{a}$
TD3	4.62×10^{5a}	40.2^{a}	45.2^{a}	$7\,738.5^{a}$	$4\,198.1^{ab}$	635.9^{ab}	32.0^{a}	$9\,561.0^{a}$
AD2	4.12×10^{5ab}	38.0^{ab}	46.2^{a}	$6\,888.0^{bc}$	$4\,131.4^{ab}$	624.0^{b}	32.0^{a}	$9\,720.0^{a}$

注：同列不同小写字母表示差异显著（$p<0.05$），下同。

2.4　深松处理对作物水分利用效率的影响

麦小麦–夏玉米复种体系作物整个生育期的作物耗水情况和水分利用效率见表 2。冬小麦季，传统深松机深松深度 35 cm 和 40 cm 处理与旋耕对照相比能够显著降低作物耗水量 25.7 mm 和 17.7 mm；所有深松处理耗水强度均显著低于旋耕处理，其中以传统深松机深松深度 35 cm 处理耗水强度最低，较旋耕对照低 5.4%；冬小麦深松处理水分利用效率均显著高于旋耕对照，提高了 0.59 ~ 2.83 kg/(hm^2·mm)，其由大到小顺序为 TD3、TD2、TD1、AD2、CK，对应处理较对照分别提高 20.3%、13.0%、7.3%、4.2%（$p<0.05$）。夏玉米季，深松处理耗水量和耗水强度均显著低于旋耕处理，耗水量降低了 7.9 ~ 32.6 mm，耗水强度降低了 0.07 ~ 0.28 mm/d，其中均以深松 + 施肥一体机深松深度 35 cm 处理最低；而夏玉米深松处理水分利用效率则显著高于旋耕处理，以深松 + 施肥一体机深松深度 35 cm 处理水分利用效率最高，较旋耕对照增加 20.1%，传统深松机处理由大到小顺序为 TD3、TD2、TD1，较对照分别提高 2.80、2.38、1.76 kg/(hm^2·mm)（$p<0.05$）。因此，深松方式能够较大幅度地提高冬小麦–夏玉米复种体系作物的水分利用效率，达到旱地冬小麦–夏玉米复种水分高效生产的目的。

表 2　冬小麦–夏玉米复种体系不同深松处理作物耗水量与水分利用效率

Tab. 2　Water consumption and water use efficiency of winter wheat-summer maize multiple cropping system with different subsoiling treatments

处理	冬小麦			夏玉米		
	耗水量/mm	耗水强度/(mm·d^{-1})	水分利用效率/(kg·hm^{-2}·mm^{-1})	耗水量/mm	耗水强度/(mm·d^{-1})	水分利用效率/(kg·hm^{-2}·mm^{-1})
CK	479.4^{a}	2.21^{a}	13.92^{b}	430.0^{a}	3.71^{a}	20.37^{c}
TD1	474.6^{a}	2.19^{b}	14.93^{ab}	412.5^{c}	3.56^{c}	22.13^{b}
TD2	453.7^{c}	2.09^{d}	15.73^{ab}	422.1^{b}	3.64^{b}	22.75^{b}
TD3	461.7^{b}	2.13^{c}	16.75^{a}	412.7^{c}	3.56^{c}	23.17^{ab}
AD2	474.8^{a}	2.19^{b}	14.51^{ab}	397.4^{d}	3.43^{d}	24.46^{a}

3　讨论

以冬小麦–夏玉米周年复种方式的豫北地区近些年一直采用冬小麦播前旋耕和夏玉米免耕贴茬播种的农作方式，该方式使土壤在亚表层形成了紧实的犁底层。尚金霞等[18]研究认为，深松可有效改善深层土壤结构，打破犁底层，增加土壤通透性能。梁金凤等[19]研究表明，深松耕作可以降低表层土壤（0 ~ 25 cm）容重，其效果大于深层土壤（25 ~ 45 cm）。也有研究报道，深松使 10 ~ 30 cm 的土壤容重降低，而 30 ~ 50 cm 差异不明显[20-21]。本研究结果显示，深松处理对 0 ~ 10 cm 土层土壤容重影响不明显，但深松处理可以使 10 ~ 30 cm 土层土壤容重显著降低，30 ~ 40 cm 差异不显著（$p>0.05$），这与之前的研究结果基本一致；其中以传统深松机深松深度 35 cm 和 40 cm 处理较为明显，对土壤容重的降低作用大于深松 + 施肥一体机处理。而本研究中深松处理 0 ~ 10 cm 土层土壤容重差异不明显，主要原因应该是由于本试验设计在深松处理后又对土壤进行了旋耕处理，与该区连年旋耕，耕层土壤受到

频繁扰动,土壤结构稳定性下降有一定影响[22]。

豫北地区冬小麦生长季降雨分布较少,降雨主要分布在夏玉米生长季[23]。该区作物生长对水分的需求很大,应更好地利用蓄积在土壤中的水分以对作物生长起更大作用。张丽等[21]研究表明,深松明显提高了土壤非毛细管的比例,加强了土壤的渗水能力,减少了因毛细管作用引起的土壤深层水分蒸发,同时可以改善土壤气体交换条件,达到蓄水保墒的效果。SU 等[24]研究表明,深松方式对深层土壤含水率有重要影响,尤其是 40 cm 土层以下的土壤含水率会显著增加。本研究表明,不同深松处理对土壤贮水量有显著影响,水分监测数据显示灌水后深松处理的水分能够向深层的土壤运移,这样能够增加深层土壤水分的蓄积,这与前人的研究结果基本一致。同时,本研究中随着深松深度的增加深层土壤水分的蓄积更为明显,这对冬小麦和夏玉米生育期吸收土壤中水分较为有利。

深松方式还可以改善土壤对作物的供水,不仅提高了农田土壤的蓄水能力,还提高了作物吸收营养和水分的能力[25-27],直接影响作物的生长和产量[28]。黄明等[29]在深松对小麦生产影响的研究中指出,深松能改善小麦产量构成要素,促进干物质的积累与转运,进而提高作物产量。本研究结果表明,深松处理能够显著增加作物的穗数和穗粒数,进而显著提升了作物的产量,且对冬小麦的增产效应大于夏玉米,其中以传统深松机深松深度 40 cm 处理的效果最好,这与前人研究的结果一致。还有研究认为,深松可以改善土壤的渗透性,增强深层土壤的蓄水保墒能力,进而提高作物水分利用效率[16,30-31]。本研究结果显示,深松能较大幅度地提高冬小麦-夏玉米复种体系作物的水分利用效率,深松处理两季平均较旋耕对照提高 12.4%,并显著降低了作物的耗水量和耗水强度($p<0.05$),表明深松方式能够有效促进作物对土壤水分的利用。综合来看,由于作物生长受不同区域小气候环境条件的影响存在较大差异,难以做到不同地区作物深松效果的一致性。因此,在本试验条件下实施的深松方式是豫北地区保持土壤低容重、高蓄水能力、提高作物产量较为理想的农田耕作方式。下一步研究的重点需要加强在不同区域、不同土壤类型以及不同农作模式下的深松试验,以期通过多生态类型的深松技术研究为农田生态的可持续发展提供理论依据。

4 结论

(1)通过对田间深松耕作方式的试验表明,在豫北潮土区,深松方式对土壤 0 ~ 10 cm 土层土壤容重影响不明显,10 ~ 30 cm 土层土壤容重显著降低,而 30 ~ 40 cm 土层土壤容重差异不显著($p>0.05$);深松处理改善了 10 ~ 30 cm 土层土壤的疏松状况,优化了土层结构。

(2)不同深松处理对土壤周年 0 ~ 100 cm 土层贮水量两季作物均高于对照 CK 处理,深松处理较旋耕对照平均增加 29.8%。同时,深松处理能够显著增加作物的穗数和穗粒数($p<0.05$),进而提高作物产量,且深松处理还能较大幅度地提高冬小麦-夏玉米复种体系作物的水分利用效率,降低了作物的耗水量和耗水强度,深松处理两季平均水分利用效率较旋耕对照提高 12.4%,其中以传统深松机深松深度 40 cm 处理的效果最佳。因此,在冬小麦播种前深松,对以旱作冬小麦-夏玉米复种体系为主的豫北地区具有很高的推广价值。

(3)深松处理不仅改善了豫北农田 10 ~ 30 cm 土层土壤的结构,增强了 0 ~ 100 cm 土层的贮水能力,对提高冬小麦和夏玉米产量及水分利用效率也有显著效果,是该地区较为适宜的耕作方式。

参 考 文 献

[1] 姜丽娜,马静丽,方保停,等. 限水减氮对豫北冬小麦产量和植株不同层次器官干物质运转的影响[J]. 作物学报,2019,45(6):957 - 966.
JIANG Li'na, MA Jingli, FANG Baoting, et al. Effect of lower water and nitrogen supply on grain yield and dry matter remobilization of organs in different layers of winter wheat plant in northern Henan Province[J]. Acta Agronomica Sinica,2019,45(6):957 - 966. (in Chinese)

[2] ZHANG K,ZHAO J,WANG X Q,et al. Estimates on nitrogen uptake in the subsequent wheat by above-ground and root residue and rhizodeposition of using peanut labeled with ^{15}N isotope on the North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture,2019,18(3):571 - 579.

[3] 白珊珊,万书勤,康跃虎. 华北平原滴灌施肥灌溉对冬小麦生长和耗水的影响[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):269 - 276.
BAI Shanshan,WAN Shuqin,KANG Yaohu. Effects of drip fertigation on winter wheat growth and water use in north China Plain [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(2):269 - 276. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180234&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.034. (in Chinese)

[4] 赵亚丽,刘卫玲,程思贤,等. 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[J]. 中国农业科学,2018,51(13):2489 - 2503.
ZHAO Yali, LIU Weiling, CHENG Sixian, 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. (in Chinese)

[5] ZHANG X Y, SHAO L W, SUN H Y, et al. Incorporation of soil bulk density in simulating root distribution of winter wheat and maize in two contrasting soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(2): 638 - 647.

[6] ZHANG Qingping, WANG Zhennan, MIAO Fuhong, et al. Dryland maize yield and water-use efficiency responses to mulching and tillage practices[J]. Agronomy Journal, 2017, 109(4): 1196 - 1209.

[7] 白伟,孙占祥,郑家明,等. 耕层构造对春玉米产量形成及生长发育特征的影响[J]. 华北农学报,2015,30(5):205 - 213.
BAI Wei, SUN Zhanxiang, ZHENG Jiaming, et al. Effect of plough layer constructions on maize growth and yield in western Liaoning Province[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2015, 30(5): 205 - 213. (in Chinese)

[8] BOOMSMA C R, SANTINI J B, WEST T D, et al. Maize grain yield responses to plant height variability resulting from crop rotation and tillage system in a long-term experiment[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 106(2): 227 - 240.

[9] TOLON-BECERRA A, TOURN M, BOTTA G F, et al. Effects of different tillage regimes on soil compaction, maize(*Zea mays* L.) seedling emergence and yields in the eastern Argentinean Pampas region[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 117: 184 - 190.

[10] LIU Z D, QIN A Z, ZHAO B, et al. Yield response of spring maize to inter-row subsoiling and soil water deficit in Northern China[J]. Plos One, 2016, 11(4): e0153809.

[11] 杨建宇,杜贞容,杜振博,等. 基于耕地质量评价和局部空间自相关的高标准农田划定[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(6):109 - 115.
YANG Jianyu, DU Zhenrong, DU Zhenbo, et al. Well facilitied capital farmland assignment based on land quality evaluation and LISA[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 109 - 115. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170614&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.014. (in Chinese)

[12] 相慧,孔祥斌,武兆坤,等. 中国粮食主产区耕地生产能力空间分布特征[J]. 农业工程学报,2012,28(24):235 - 244.
XIANG Hui, KONG Xiangbin, WU Zhaokun, et al. Spatial distribution characteristics of potential productivity of arable land in main crop production area in China[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(24): 235 - 244. (in Chinese)

[13] 沈仁芳,王超,孙波. “藏粮于地、藏粮于技”战略实施中的土壤科学与技术问题[J]. 中国科学院院刊,2018,33(2):135 - 144.
SHEN Renfang, WANG Chao, SUN Bo. Soil related scientific and technological problems in implementing strategy of “storing grain in land and technology”[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 135 - 144. (in Chinese)

[14] 刘文政,李问盈,郑侃,等. 我国保护性耕作技术研究现状及展望[J]. 农机化研究,2017,39(7):256 - 261,268.
LIU Wenzheng, LI Wenying, ZHENG Kan, et al. The current research status of conservation tillage technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(7): 256 - 261, 268. (in Chinese)

[15] 张祥彩,李洪文,何进,等. 耕作方式对华北一年两熟区土壤及作物特性的影响[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):77 - 82,71.
ZHANG Xiangcai, LI Hongwen, HE Jin, et al. Effects of different tillage managements on characteristics of soil and crop in annual double cropping areas in northern China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44 (Supp. 1): 77 - 82, 71. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2013s115&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.015. (in Chinese)

[16] 王浩,王淑兰,徐宗贵,等. 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[J]. 中国生态农业学报,2017,25(6):856 - 864.
WANG Hao, WANG Shulan, XU Zonggui, et al. Effect of tillage and fertilization on water use efficiency of maize in dryland conditions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 856 - 864. (in Chinese)

[17] YAN Z X, GAO C, REN Y J, et al. Effects of pre-sowing irrigation and straw mulching on the grain yield and water use efficiency of summer maize in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2017, 186(5): 21 - 28.

[18] 尚金霞,李军,贾志宽,等. 渭北旱塬春玉米田保护性耕作蓄水保墒效果与增产增收效应[J]. 中国农业科学,2010,43(13):2668 - 2678.
SHANG Jinxia, LI Jun, JIA Zhikuan, et al. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures in spring maize field on Weibei Highland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(13): 2668 - 2678. (in Chinese)

[19] 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 Jinfeng, QI Qingzhen, JIA Xiaohong, et al. Effects of different tillage managements on soil properties and corn growth [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(4): 945 - 950. (in Chinese)

[20] 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.
QI Hua, LIU Ming, ZHANG Weijian, et al. Effect of deep loosening mode on soil physical characteristics and maize root distribution[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2012, 27(4): 191 - 196. (in Chinese)

[21] 张丽,张中东,郭正宇,等. 深松耕作和秸秆还田对农田土壤物理特性的影响[J]. 水土保持通报,2015,35(1):102 - 106.

ZHANG Li, ZHANG Zhongdong, GUO Zhengyu, et al. Effects of subsoiling tillage and straw returning to field on soil physical properties[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 102 - 106. (in Chinese)

[22] 蒋向,贺德先,任洪志,等. 轮耕对麦田土壤容重和小麦根系发育的影响[J]. 麦类作物学报,2012,32(4):711 - 715.
JIANG Xiang, HE Dexian, REN Hongzhi, et al. Effects of different patterns of rotational tillage on soil bulk density in wheat field and wheat root development[J]. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32(4): 711 - 715. (in Chinese)

[23] 陈震,李金山,黄修桥,等. 豫北冬小麦、夏玉米多年需灌水次数及典型生育期需灌水分析[J]. 中国生态农业学报,2016,24(3):274 - 283.
CHEN Zhen, LI Jinshan, HUANG Xiuqiao, et al. Multi-years required irrigation times of winter wheat and summer maize and analysis of irrigation in representative growing seasons in northern Henan[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(3): 274 - 283. (in Chinese)

[24] SU Z Y, ZHANG J S, WU W L, et al. Effects of conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(3): 307 - 314.

[25] MOHANTY M, BANDYOPADHYAY K K, PAINULI D K, et al. Water transmission characteristics of a Vertisol and water use efficiency of rainfed soybean(*Glycine max*(L.) Merr.) under subsoiling and manuring[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93(2): 420 - 428.

[26] 赵亚丽,郭海斌,薛志伟,等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米轮作系统中干物质生产和水分利用效率的影响[J]. 作物学报,2014,40(10):1797 - 1807.
ZHAO Yali, GUO Haibin, XUE Zhiwei, et al. Effects of tillage and straw returning on biomass and water use efficiency in a winter wheat and summer maize rotation system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(10): 1797 - 1807. (in Chinese)

[27] 何明,高焕文,董培岩,等. 一年两熟地区保护性耕作深松试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(7):58 - 63.
HE Ming, GAO Huanwen, DONG Peiyan, et al. Sub-soiling experiment on double cropping and conservation tillage adopted area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 58 - 63. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180707&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.007. (in Chinese)

[28] 吕美蓉,李增嘉,张涛,等. 少免耕与秸秆还田对极端土壤水分及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(1):41 - 46.
LÜ Meirong, LI Zengjia, ZHANG Tao, et al. Effects of minimum or no-tillage system and straw returning on extreme soil moisture and yield of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 41 - 46. (in Chinese)

[29] 黄明,吴金芝,李友军,等. 不同耕作方式对旱作冬小麦旗叶衰老和籽粒产量的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(6):1355 - 1361.
HUANG Ming, WU Jinzhi, LI Youjun, et al. Effects of tillage pattern on the flag leaf senescence and grain yield of winter wheat under dry farming[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(6): 1355 - 1361. (in Chinese)

[30] 李荣,侯贤清. 深松条件下不同地表覆盖对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(20):115 - 123.
LI Rong, HOU Xianqing. Effects of different ground surface mulch under subsoiling on potato yield and water use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 115 - 123. (in Chinese)

[31] 郑成岩,于振文,张永丽,等. 土壤深松和补灌对小麦干物质生产及水分利用率的影响[J]. 生态学报,2013,33(7):2260 - 2271.
ZHENG Chengyan, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al. Effects of subsoiling and supplemental irrigation on dry matter production and water use efficiency in wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2260 - 2271. (in Chinese)