



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

立式旋耕对小麦生长季土壤紧实度及产量的影响

聂胜委, 张浩光, 张巧萍, 许纪东, 张玉亭

引用本文:

聂胜委, 张浩光, 张巧萍, 等. 立式旋耕对小麦生长季土壤紧实度及产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 36–42.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0103>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期定位耕作方式下冬小麦田根系呼吸对土壤呼吸的贡献

周鹏翀, 沈莹, 许姣姣, 韩惠芳, 宁堂原, 李增嘉

农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 766–773 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0338>

粉垄耕作对潮土冬小麦田间群体微环境的影响

聂胜委, 张玉亭, 汤丰收, 何宁, 黄绍敏, 张巧萍, 韦本辉

农业资源与环境学报. 2015(2): 204–208 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0328>

耕作对健康耕层结构的影响及发展趋势

胡钧铭, 陈胜男, 韦翔华, 夏旭, 韦本辉

农业资源与环境学报. 2018, 35(2): 95–103 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0242>

免耕旧膜再利用对玉米产量及灌溉水生产力的影响

苏永中, 张珂, 刘婷娜, 王婷

农业资源与环境学报. 2016, 33(5): 491–498 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0055>

增施有机肥对稻田亚耕层土壤的培肥效应

韩上, 武际, 张祥明, 胡鹏, 杨友兵, 李敏, 王慧, 唐杉

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 334–341 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0319>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

聂胜委, 张浩光, 张巧萍, 等. 立式旋耕对小麦生长季土壤紧实度及产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 36–42.

NIE Sheng-wei, ZHANG Hao-guang, ZHANG Qiao-ping, et al. Effects of vertical rotary tillage on wheat yield and soil compaction during wheat growing seasons[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1): 36–42.



开放科学 OSID

立式旋耕对小麦生长季土壤紧实度及产量的影响

聂胜委¹, 张浩光², 张巧萍¹, 许纪东², 张玉亭¹

(1.河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; 2.遂平县农业科学试验站, 河南 遂平 463100)

摘要:为了探究土壤立式旋耕方式对小麦生长季关键生育时期土壤紧实状况的影响,以常规旋耕(TR, 12 cm±5 cm)为对照,连续两季(2017—2018年和2018—2019年)研究了立式旋耕(VR, 30 cm±5 cm)在不施肥(nF)、施肥(F)条件下小麦关键生育时期土壤紧实度、产量及养分效率的变化。结果表明,与常规旋耕相比,立式旋耕能连续两季持续增加小麦产量,提高氮肥利用率,降低耕层土壤紧实程度;而且立式旋耕能进一步激发土地生产潜力,与常规旋耕不施肥(nFTR)处理相比,2018年立式旋耕施肥(FVR)、常规旋耕施肥(FTR)处理产量分别增加50.16%、36.28%,2019年分别增加42.91%、34.79%。与FTR处理相比,FVR氮肥农学效率提高38.29%(2018年)、23.35%(2019年);氮肥偏生产力提高10.15%(2018年)、6.02%(2019年)。与常规旋耕相比,立式旋耕能显著降低第一季小麦拔节期、灌浆期10 cm土壤耕层的紧实度;而第二季处理间差异不显著。立式旋耕能降低小麦拔节期20 cm耕层土壤紧实度,在施肥情况下显著降低。两种耕作方式下灌浆期5 cm耕层的土壤紧实度差异不显著。研究表明,立式旋耕较常规旋耕能够有效降低当季小麦拔节期、灌浆期耕层(10 cm)土壤的紧实度,构建良好的土壤结构,提高小麦产量和养分利用率。

关键词:耕作方式;小麦生长季;土壤紧实度;产量

中图分类号:S512.1

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2021)01-0036-07

doi: 10.13254/j.jare.2020.0103

Effects of vertical rotary tillage on wheat yield and soil compaction during wheat growing seasons

NIE Sheng-wei¹, ZHANG Hao-guang², ZHANG Qiao-ping¹, XU Ji-dong², ZHANG Yu-ting¹

(1. Institute of Plant Nutrient and Environmental Resources, Henan Academy of Agricultural Science, Zhengzhou 450002, China; 2. Experiment Station of Agricultural Science in Suiping County, Suiping 463100, China)

Abstract: To explore the effects of vertical rotary tillage (VR) on soil compaction during the wheat growth periods, the effects of VR (30 cm±5 cm) and traditional rotary tillage (TR, 12 cm±5 cm) under no fertilization (nF) and fertilization (F) levels, respectively, on wheat grain yields, nitrogen use efficiency, and soil compactions during two consecutive seasons (2017—2018 and 2018—2019) were studied. The results showed that VR increased wheat yield, improved nitrogen use efficiency, decreased soil compaction, and improved soil productivity compared to TR. Compared with nFTR treatment, FVR and FTR treatment related grain yield increased by 50.16% and 36.28%, respectively, in 2018 and by 42.91% and 34.79%, respectively, in 2019. Nitrogen agronomic efficiency of FVR increased by 38.29% in 2018 and 23.35% in 2019 compared with FTR. Partial factor productivity of nitrogen for FVR treatment increased by 10.15% in 2018 and 6.02% in 2019. Compared to TR, VR significantly reduced soil compaction in the 10 cm soil layer depth at the elongation stage and filling stage in the first season. However, there were no significant differences between the two tillages in the following season. VR tillage could also reduce soil compactions in the 20 cm soil layer depth at the elongation stage, and significantly reduced soil compaction

收稿日期: 2020-03-08 录用日期: 2020-04-29

作者简介: 聂胜委(1979—), 男, 河南汝州人, 博士, 副研究员, 主要从事耕作制度与废弃物资源化利用方面的研究。E-mail: nsw2004@126.com

基金项目: 国家重点研发专项(2017YFD0201702); 河南省肉牛产业技术体系建设专项(S2013-08-G03)

Project supported: The National Key Research and Development Project (2017YFD0201702); The Special Fund for Henan Agriculture Research System (S2013-08-G03)

under fertilizer conditions. Additionally, there were no significant differences between the two tillage for soil compactions in the 5 cm soil depth layers. VR could effectively decrease soil compaction in the 10 cm soil layer depth at the wheat elongation and filling stages, constructed better soil structures, and increased wheat grain yields and nitrogen agronomic efficiency.

Keywords: cultivation; wheat growth period; soil compaction; yield

土壤紧实度(或称为土壤穿透阻力)是衡量土壤抵抗外力的压实和破碎的能力,通常用金属柱塞或探针压入土壤时的阻力表示。它影响土壤的通透性、温度、水分、微生物数量和活性、养分转化、植物根系生长以及养分吸收等,是土壤物理特性的重要反映。土壤紧实度影响农业可持续发展^[1],其对作物生长和产量的影响是当前关注的热点之一,欧盟委员会认为土壤紧实是导致作物产量降低的主要因素^[2]。调查发现,在小麦/玉米一年两熟区连续多年的旋耕、少免耕作业,导致农田耕层变浅,犁底层变厚上移,耕层质量变劣趋势加剧^[3]。

土壤紧实首先影响土壤结构和孔隙度,进而影响植物根系生长^[4],最终影响产量。随着土壤紧实度增加,土壤容重随之增加,孔隙度下降,作物对养分的吸收减少,产量下降^[5];机械碾压、不适当的耕作和农事操作都能造成土壤紧实度增大^[6]。连续免耕会造成土壤紧实,作物减产,适当犁翻耕能提高产量^[7]。土壤紧实显著降低作物产量和氮的吸收,降低收获期种子含水率,但是对容重和千粒质量影响不明显^[8]。土壤紧实能够降低作物产量和水分利用效率,干土上车轮压实对作物生长的影响较小,湿土上车轮压实影响较大^[9]。冻融交替是自然降低土壤紧实度的有效方法。与亏缺灌溉相比,大水漫灌会引起深耕之后的土壤更加紧实,因此,应减少深耕之后的灌溉程度^[10]。秸秆覆盖和轮作豆科的保护性耕作能够改善土壤物理结构,降低次耕层紧实状况,促进小麦根系生长^[11]。

农田耕作是改善土壤耕层结构,协调水、肥、气、热环境因子,提高土壤通透性,优化水肥供应能力的有效措施^[12]。立式旋耕是一种新的农田耕作方式,它用动力机械带动立式旋耕机的垂直螺旋钻头直立旋转切磨粉碎土壤,达到深松、旋耕整地效果^[13]。钻轴入土深度可达30~60 cm,能深度打破犁底层,改善土壤结构,获得较高产量^[14]。研究表明,在同等施肥量条件下,与常规旋耕、翻耕等耕作方式相比,立式旋耕(粉垄)可以提高小麦^[15-16]、玉米^[17-18]、水稻^[19]等多种作物产量,改善品质,促进根系生长^[20]。这些研究为解决我国小麦生产上的土壤耕层紧实、退化以及变浅等问题,实现绿色可持续发展提供了重要思路。

本研究以立式旋耕(30 cm±5 cm)、常规旋耕(12 cm±5 cm)两种不同土壤耕作方式为基础,研究其对小麦生长季拔节期、灌浆期土壤耕层紧实度、小麦产量以及养分利用率的影响,为实现小麦绿色可持续生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于河南省遂平县农业科学试验站(33°15'N, 113°98'E),属暖温带大陆性季风气候。光照充足,气候温和,雨量充沛,四季分明,亚热带向暖温带过渡性气候特性较明显。年平均气温、日照、降水量、无霜期分别为15.1℃、2 126 h、927 mm、226 d。土壤类型为砂姜黑土,重壤偏黏,中性偏弱酸性(pH=5.9)。试验地基础土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为6.52 g·kg⁻¹、18.6 mg·kg⁻¹、110.40 mg·kg⁻¹、139.10 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验为双因素裂区设计,设常规旋耕(Traditional rotary tillage, TR)、立式旋耕(VERTICAL rotary tillage, VR)2种耕作方式,不施肥(None-fertilizer, nF)、施肥(Fertilizer, F)2个施肥水平,每个处理重复3次,共计12个小区,小区面积8 m×6 m。施肥处理的施肥量为:氮肥300 kg N·hm⁻²、磷肥82.5 kg P₂O₅·hm⁻²,钾肥82.5 kg K₂O·hm⁻²。其中施肥处理中,70%的氮肥和全部磷、钾肥作基肥在整地时一次施入,剩余30%氮肥在拔节期作追肥施入;不施肥处理作为对照用于计算氮肥利用率。①常规旋耕(TR, 12 cm±5 cm):上茬作物为青贮玉米,收获后粉碎灭茬,后用普通旋耕机深旋耕2遍,整地深度为12 cm±5 cm,再用常规旋耕机平整1遍(深度5~10 cm),播种;②立式旋耕(VR, 30 cm±5 cm):上茬作物为青贮玉米,收获后粉碎灭茬,后用立式旋耕机深旋耕1遍,整地深度为30 cm±5 cm,再用常规旋耕机平整1遍(深度5~10 cm),播种。

小麦品种为遂选101(豫审麦2015004,河南平安种业有限公司、遂平县农业科学试验站选育),分别在2017年10月和2018年10月下旬机播条播,播量150 kg·hm⁻²,行距20 cm,分别于2018、2019年6月上

旬收获;下茬各处理常规种植夏玉米,机播楼贴茬播种,其他田间管理措施等保持一致。

1.3 测定项目

在小麦播种前测定0~20 cm土壤碱解氮、有效磷、速效钾、有机质等基础养分含量,分别采用碱解扩散法、 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 法、乙酸铵浸提-火焰光度法、重铬酸钾法进行测定^[21];小麦拔节期(2018/03/12、2019/03/27)、灌浆期(2018/05/04、2019/05/04)用紧实度仪(SY-T02,邢台润联科技有限公司,中国)测定5、10、20 cm耕层土壤紧实度,每个小区及耕层分别重复测定6次;小麦成熟期,每个小区选取4 m²实收测产。氮肥农学效率、氮肥偏生产力^[22]采用以下公式计算:

氮肥农学效率($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=(施氮肥区产量-对照区产量)/施用氮肥总量

氮肥偏生产力($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=作物施肥后产量/氮肥施用量。

1.4 数据分析

数据用Excel 2003、SPSS 20.0等软件进行整理,用LSD法进行显著性分析,显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式小麦产量的比较

在相同田间管理水平下,由于耕作方式不同,构建的耕层及紧实度条件也不同,因而获得的籽粒产量存在着较大差异。由表1可以看出,不施肥条件下,2018年,立式旋耕不施肥(nFVR)、常规旋耕不施肥(nFTR)处理小麦产量分别为7 011.9、5 227.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,nFVR显著高于nFTR处理,增加1 784.4 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;2019年,nFVR($6\,808.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)>nFTR($6\,652.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),产量增加156.6 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,差异不显著。在施肥条件下,立式旋耕施肥(FVR)处理的小麦产量均高于常规旋耕施肥(FTR)处理,产量分别高出725.6 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (2018年)、540.7 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (2019年),但是处理间差异不显著。

与nFTR处理产量相比,2018年FVR处理产量增幅50.16%,FTR处理增幅36.28%,FVR>FTR;2019年,FVR处理产量增幅42.91%,FTR处理增幅34.79%,FVR>FTR。立式旋耕施肥处理两年的产量增加量均较大幅度高于常规旋耕处理,说明立式旋耕结合施肥能进一步激发土地的生产潜力。

2.2 不同耕作方式小麦生长季的土壤紧实度比较

不同耕作方式下小麦生长季土壤紧实度的变化如图1~3所示。

在施肥条件下,由图1可以看出,2018年,小麦拔节期FVR处理10 cm耕层土壤的紧实度为30.23 N,显著低于FTR处理(55.23 N)。灌浆期与之相似,FVR处理10 cm耕层土壤的紧实度为53.30 N,显著低于FTR(87.54 N)。2019年,在同一地块上分别连续重复2018年的耕作方式,拔节期FVR处理10 cm耕层土壤的紧实度(120.27 N)高于FTR(96.45 N),差异不显著;灌浆期10 cm耕层土壤的紧实度表现为FVR略低于FTR处理,差异不显著。

在不施肥条件下,由图2可以看出,2018年,拔节期nFVR处理10 cm耕层土壤的紧实度为24.63 N,显著低于nFTR(93.37 N);灌浆期10 cm耕层土壤紧实度表现为nFVR(50.60 N)<nFTR(74.44 N),差异不显著。2019年,10 cm耕层土壤紧实度表现为拔节期nFVR(126.13 N)>nFTR(108.32 N);灌浆期nFVR(135.43 N)<nFTR(187.30 N),差异均不显著。

为了进一步研究紧实度在土壤耕层的表层(5 cm)和深层(20 cm)的变化情况,对5、20 cm耕层土壤的紧实度进行了测定(图3),不施肥条件下,小麦拔节期nFVR、nFTR处理20 cm耕层土壤的紧实度分别为177.03、287.28 N;灌浆期,nFVR、nFTR处理5 cm耕层土壤的紧实度分别为116.53、102.70 N,差异均不显著。施肥条件下,小麦拔节期FVR、FTR处理20 cm耕层土壤的紧实度分别为164.33、314.53 N,FVR处

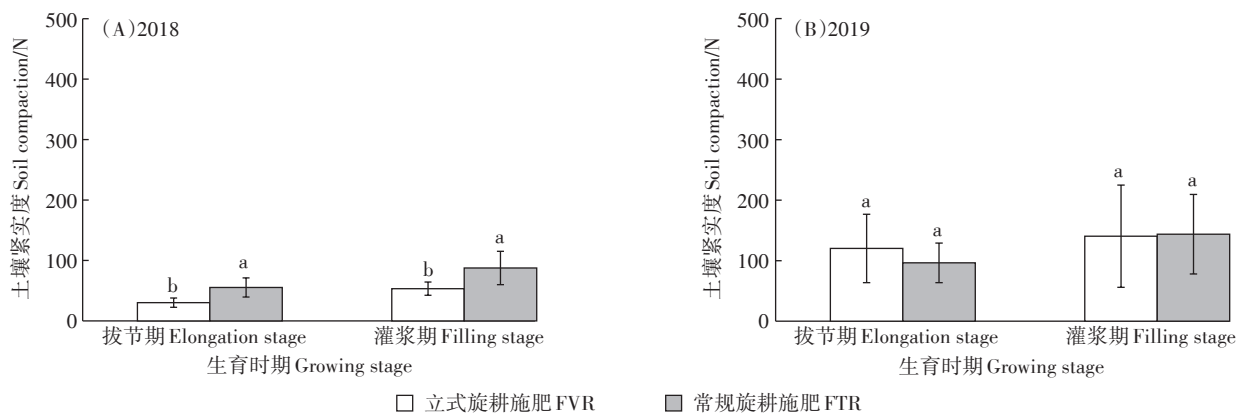
表1 不同耕作方式下小麦籽粒产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 1 Wheat grain yields under different tillage during harvested stages($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

处理 Treatments	2018		2019	
	产量 Yield	与nFTR间产量差 Yield differences with nFTR	产量 Yield	与nFTR间产量差 Yield differences with nFTR
nFVR	7 011.9±512.3a	1 784.4	6 808.9±932.3bc	156.6
nFTR	5 227.5±565.1b	—	6 652.3±499.3c	—
FVR	7 849.4±668.1a	2 621.9	9 507.1±142.8a	2 854.8
FTR	7 123.8±658.3a	1 896.3	8 966.4±1 672.7ab	2 314.1

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P \leq 0.05$)。

Notes: Different lowercase letters in the same column mean significant difference at $P \leq 0.05$ level.



同一时期不同处理间小写字母表示差异显著 ($P \leq 0.05$)。下同

Different lowercase letters in the same growing stage mean significant difference at $P \leq 0.05$ levels. The same below

图1 施肥条件下不同耕作方式土壤紧实度(10 cm耕层)的比较

Figure 1 Soil compaction(10 cm soil depth) under different tillage at fertilization levels

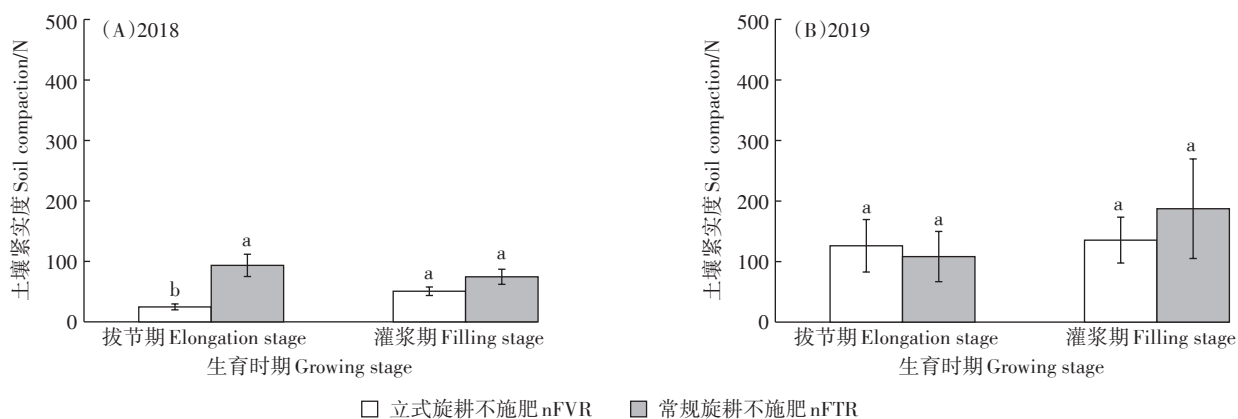


图2 不施肥条件下不同耕作方式土壤紧实度(10 cm耕层)的比较

Figure 2 Soil compaction(10 cm soil depth) under different tillage at none fertilization levels

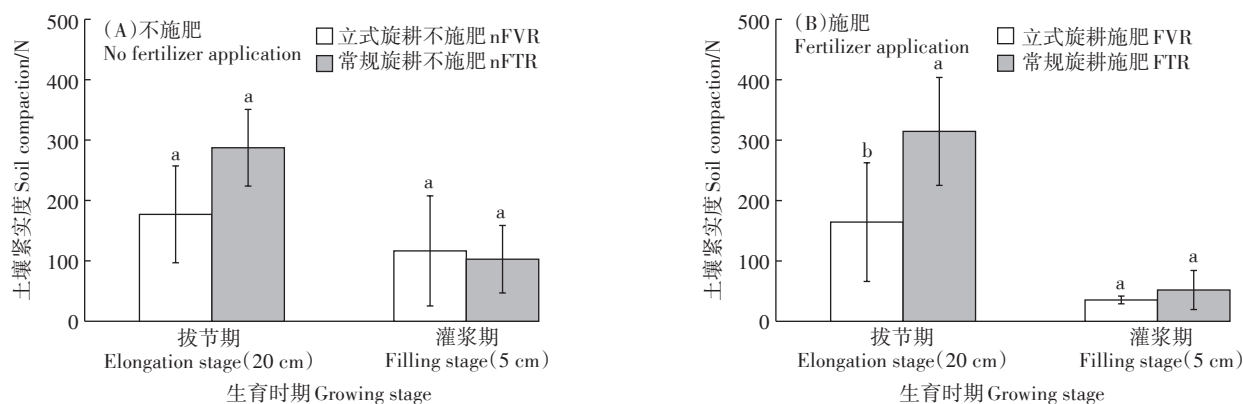


图3 不同耕作方式5 cm耕层土壤和20 cm耕层土壤的紧实度比较

Figure 3 Soil compaction(5 cm and 20 cm soil depth) under different tillage at fertilization and none fertilization levels

理显著低于FTR处理;灌浆期,FVR、FTR处理5 cm耕层土壤的紧实度分别为35.43、51.90 N,差异不显著。

2.3 不同耕作方式氮肥效率的比较

不同的土壤耕作方式构建了小麦生长季不同的

土壤紧实状况,导致了产量的差异,反映到养分效率上,以各耕作方式对应的不施肥处理(nFVR、nFTR)来计算氮肥农学效率,由图4A可以看出,2018年,FVR、FTR处理的氮肥农学效率分别为5.05、6.32 kg·

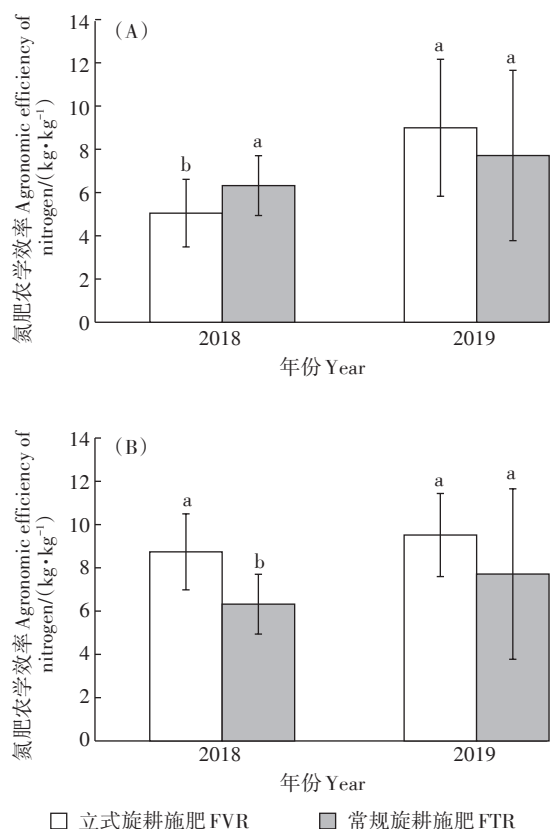


图4 施肥条件下不同耕作方式间氮肥农学效率的比较
Figure 4 Agronomic efficiency of nitrogen fertilizer under different tillage

kg⁻¹, FVR比FTR处理低1.27 kg·kg⁻¹, 差异显著; 2019年分别为8.99、7.71 kg·kg⁻¹, FVR比FTR处理氮肥农学效率提高16.60%, 差异不显著。

若均以常规旋耕不施肥(nFTR)来计算氮肥农学效率, 由图4B可以看出, 不同土壤耕作方式连续两个小麦季FVR处理的氮肥农学效率均高于FTR处理; 2018年, FVR(8.74 kg·kg⁻¹)比FTR(6.32 kg·kg⁻¹)处理氮肥农学效率提高38.29%, 差异显著; 2019年, FVR(9.52 kg·kg⁻¹)比FTR(7.71 kg·kg⁻¹)氮肥农学效率提高23.35%, 差异不显著。

不同耕作方式下氮肥对当季小麦产量的贡献如图5所示, 2018年, FVR、FTR处理的氮肥偏生产力分别为26.16、23.75 kg·kg⁻¹, FVR比FTR提高10.15%, 差异显著; 2019年分别为31.69、29.89 kg·kg⁻¹, FVR比FTR氮肥偏生产力提高6.02%, 差异不显著。说明立

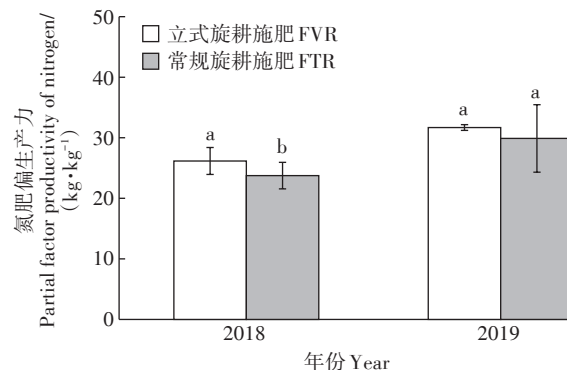


图5 施肥条件下不同耕作方式氮肥偏生产力的比较
Figure 5 Partial factor productivity of nitrogen fertilizer under different tillage

式旋耕方式下, 相同的氮肥施用量对小麦籽粒产量的贡献大于常规旋耕。2018年, 不施肥小麦产量表现为nFVR(7 011.9 kg·hm⁻²)>nFTR(5 227.5 kg·hm⁻²), 小麦第一季采用nFVR处理来计算氮肥农学效率, 导致计算出的氮肥农学效率相对偏低。

3 讨论

已有研究发现, 随着土壤紧实度提高, 小麦分蘖成穗率降低, 产量下降^[23]; 降低土壤紧实度能显著提高耕作层土壤的非毛管孔隙度, 增加甘薯块根形成期(20~40 d)土壤最高温度与最低温度的温差; 提高块根膨大期(45~165 d)块根中蔗糖合成酶(SS)、腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(ADPGPase)活性, 增加淀粉含量, 提高块根中干物质积累初始势, 增产20.01%~27.78%^[24]。在技术途径上, 利用微孔深松耕可有效打破犁底层, 降低土壤紧实程度, 提高棉花品质和产量^[25]。本研究发现, 立式旋耕(VR, 30 cm±5 cm)所构建的土壤结构和耕层比常规旋耕(TR, 12 cm±5 cm)更能发挥土壤潜力, 与nFTR相比, 2018年, FVR、FTR处理产量分别增加2 621.9、1 896.3 kg·hm⁻²; 2019年, FVR、FTR处理产量分别增加2 854.8、2 314.1 kg·hm⁻²; 增幅均表现出FVR>FTR。

另一方面, 旋耕土壤能明显增加15~40 cm土层紧实度, 随着紧实度的增加土壤内部温度变化幅度增大, 土壤缓冲性能降低^[26]。本研究中, 土壤进行立式旋耕后经过小麦季的生长, 在返青拔节期、灌浆期10 cm耕层土壤的紧实度均低于旋耕处理, 但是这种效应仅在当季较为明显; 而且立式旋耕能减缓小麦拔节期深层土壤(20 cm)的紧实度, 这种现象在施肥条件下表现显著, 有利于小麦返青早发, 促进小麦生长; 小

麦灌浆期,两种耕作方式对土壤表层(5 cm)的紧实度影响较小,差异不显著。说明改进耕作方式,能构建适宜小麦生长的土壤结构,激发土壤的生产潜力。同时,作为农田土壤耕作方法中的突破和创新,立式旋耕不仅能够增加土壤耕层厚度,改善土壤结构,而且在一定程度上能实现犁翻耕和旋耕的结合,减少大型机械进地作业次数及对土壤造成的二次碾压,这对于改善和恢复农田旱作区的土壤功能、提高土壤质量具有积极的意义,应用前景良好。但在实际生产中,应考虑当地具体的土壤质地、地形地貌、耕作制度及农机操作人员的熟练程度等因素,选择适宜当地作物生长的耕层厚度。

4 结论

(1)施肥条件下,与常规旋耕相比,立式旋耕能显著降低第一季小麦拔节期、灌浆期10 cm耕层土壤的紧实度,第二季则处理间差异不显著;不施肥条件下趋势相似。立式旋耕能降低小麦拔节期20 cm耕层土壤紧实度,在施肥情况下显著降低。两种耕作方式下灌浆期5 cm耕层的土壤紧实度差异不显著。

(2)立式旋耕能连续两季持续增加小麦产量,而且能进一步激发土地生产潜力,与常规旋耕不施肥处理相比,立式旋耕施肥处理产量增幅为50.16%(2018年)、42.91%(2019年);氮肥农学效率提高38.29%(2018年)、23.35%(2019年),且当季增幅显著;氮肥偏生产力提高10.15%(2018年)、6.02%(2019年)。

总之,立式旋耕较常规旋耕能够有效降低小麦拔节期、灌浆期耕层土壤的紧实度,构建良好的土壤结构,提高小麦产量和养分利用率。

参考文献:

- [1] Steniter E, Murer E. Impact of soil compaction upon soil water balance and maize yield estimated by the SIMWASER model[J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 73(1/2): 43-56.
- [2] Commission of the European Communities. Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee, the Committee of the Regions: A mid-term assessment of implementing the EC biodiversity action plan[J]. *Journal of International Wildlife Law & Policy*, 2009, 12(1/2): 108-120.
- [3] 石彦琴. 华北平原农田土壤耕层结构质量评价方法构建与实证研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2011. SHI Yan-qin. Quality evaluation on soil structure of the tilled layer in the North China Plain: Construction method and case studies[D]. Beijing: China Agricultural University, 2011.
- [4] Lipiec J, Horn R, Pietrusiewicz J, et al. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species[J]. *Soil & Tillage Research*, 2012, 121: 74-81.
- [5] Ahmad N, Hassan F U, Belford R K. Effect of soil compaction in the sub-humid cropping environment in Pakistan on uptake of NPK and grain yield in wheat I. Compaction[J]. *Field Crops Research*, 2009, 110: 54-60.
- [6] Ishaq M, Hassan A, Saeed M, et al. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan I. Soil physical properties and crop yield[J]. *Soil & Tillage Research*, 2001, 59: 57-65.
- [7] Devision S P, Bruno M S, de Oliveria G C, et al. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 194: 104307.
- [8] Alakukku L, Elonen P. Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops[J]. *Soil & Tillage Research*, 1995, 36(3/4): 141-152.
- [9] Radford B J, Yule D F, McGarry D, et al. Crop responses to applied soil compaction and to compaction repair treatments[J]. *Soil & Tillage Research*, 2001, 61(3/4): 157-166.
- [10] Liu X W, Feike T, Shao L W, et al. Effects of different irrigation regimes on soil compaction in a winter wheat-summer maize cropping system in the North China Plain[J]. *Catena*, 2016, 137: 70-76.
- [11] Mondal S, Chakraborty D, Das T K, et al. Conservation agriculture had a strong impact on the sub-surface soil strength and root growth in wheat after a 7-year transition period[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 195: 04385.
- [12] 张丽. 深松和培肥对旱地农田土壤水分保蓄能力及玉米生长的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. ZHANG Li. Study on capacity of soil moisture conservation and the response of maize growth in dry-land[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [13] 聂胜委, 张玉亭, 张巧萍, 等. 立式旋耕整地技术规程: DB41/T 1558—2018[S]. 郑州: 河南省质量技术监督局, 2018. NIE Sheng-wei, ZHANG Yu-ting, ZHANG Qiao-ping, et al. The practice technology rule for vertical rotary tillage: DB41/T 1558—2018[S]. Zhengzhou: Henan Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision, 2018.
- [14] 聂胜委, 张玉亭, 汤丰收, 等. 粉垄耕作对潮土冬小麦生长及产量的影响初探[J]. 河南农业科学, 2015, 44(2): 19-21, 43. NIE Sheng-wei, ZHANG Yu-ting, TANG Feng-shou, et al. Effects of smashing ridge tillage on growth and yield of winter wheat in fluvo-aquic soil region[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44(2): 19-21, 43.
- [15] 聂胜委, 张玉亭, 汤丰收, 等. 粉垄耕作对潮土冬小麦田间群体微环境的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(2): 204-208. NIE Sheng-wei, ZHANG Yu-ting, TANG Feng-shou, et al. Effect of smash ridging tillage on micro-environment of winter wheat group in fluvo-aquic soil farmlands[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(2): 204-208.
- [16] Nie S W, Enejil A E, Huang S M, et al. Smash-ridging tillage increases wheat yield and yield component in the Huaihe valley, China[J].

- Journal of Food, Agricultural & Environment*, 2013, 11(2):453-455.
- [17] 李铁冰, 逢焕成, 李华, 等. 粉垄耕作对黄淮海北部春玉米籽粒灌浆及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(14): 3055-3064. LI Yi-bing, PANG Huan-cheng, LI Hua, et al. Effects of deep vertically rotary tillage on grain filling and yield of spring maize in north Huang-Huai-Hai region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(14):3055-3064.
- [18] 靳晓敏, 杜军, 沈润泽, 等. 宁夏引黄灌区粉垄栽培对玉米生长和产量的影响[J]. 农业科学研究, 2013, 34(1): 50-54. JIN Xiao-min, DU Jun, SHEN Run-ze, et al. The effect of smashing-ridging cultivation, technology on the growth and yield corn in Yellow River irrigation district of Ningxia[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 34(1):50-54.
- [19] 韦本辉, 刘斌, 甘秀芹, 等. 粉垄栽培对水稻产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(19): 3946-3954. WEI Ben-hui, LIU Bin, GAN Xiu-qin, et al. Effect of Fenlong cultivation on yield and quality of rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(19): 3946-3954.
- [20] 韦本辉, 申章佑, 甘秀芹, 等. 粉垄栽培对旱地作物产量品质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2012, 14(4): 101-105. WEI Ben-hui, SHEN Zhang-you, GAN Xiu-qin, et al. Effects of Felong cultivation on yield and quality of dryland crops[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2012, 14(4):101-105.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1992:25-97. BAO Shi-dan. Analysis of soil chemistry and agriculture[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1992:25-97.
- [22] 聂胜委, 黄绍敏, 张水清, 等. 长期定位施肥对冬小麦吸收利用氮素的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1037-1043. NIE Sheng-wei, HUANG Shao-min, ZHANG Shui-qing, et al. Impacts of nitrogen uptake by winter wheat under various long-term located fertilizations[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(6): 1037-1043.
- [23] 贺明荣, 王振林. 土壤紧实度变化对小麦籽粒产量和品质的影响[J]. 西北植物学报, 2004, 24(4):649-654. HE Ming-rong, WANG Zhen-lin. Effects of soil compaction on grain yield and quality of wheat[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24(4): 649-654.
- [24] 史文卿, 张彬彬, 柳洪鹏, 等. 甘薯块根形成和膨大对土壤紧实度的响应机制及与产量的关系[J]. 作物学报, 2019, 45(5):755-763. SHI Wen-qing, ZHANG Bin-bin, LIU Hong-juan, et al. Response mechanism of sweet potato storage root formation and bulking to soil compaction and its relationship with yield[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(5):755-763.
- [25] 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, 31(8): 7-14. WANG Hui-jie, HAO Jian-ping, FENG Rui-yun, et al. Microhole subsoiling decreasing soil compaction, and improving yield and seed quality of cotton[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(8):7-14.
- [26] 焦彩强, 王益权, 刘军, 等. 关中地区耕作方法与土壤紧实度时空变异及其效应分析[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 7-12. JIAO Cai-qiang, WANG Yi-quan, LIU Jun, et al. Spatial-temporal variability of soil hardness and effect of soil hardness on other soil properties in rotary tillage in Guanzhong farmland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(3):7-12.