

专栏:粮食作物生产安全

【特约主持人】朱桂芬:河南省高等学校科技创新团队带头人,河南省教育厅学术技术带头人,河南省化学学会理事

【主持人按语】夯实粮食安全基础是促进粮食产业高质量发展的重要保障。加强农业科技创新,因地制宜优化耕作栽培措施对于提高粮食综合生产能力,改善农田氮素养分吸收利用有积极效应;有效推动绿色兴农,改善农业生态环境,对实现国家粮食安全和农业高质量发展意义重大。土壤环境质量是确保粮食生产安全的关键,进入土壤环境的大量微塑料等新污染物会损害农田生态系统,对土壤农作物生长及生理性状产生不良影响,所导致的生态毒性效应会威胁粮食安全,进而可能危害到人类健康,这一现象不容小觑。本专栏围绕高产高效绿色生产和农田作物系统污染评估进行讨论,其中《耕作方式对旱作区麦-玉轮作体系小麦产量、氮素利用和土壤硝态氮残留的影响》研究发现,深松耕作方式能够有效提高小麦产量,促进氮素积累、转运和利用,降低土壤硝态氮残留量,是黄河中游旱作麦-玉轮作区小麦高产高效且环境友好的耕作方式。《微塑料及其复合污染对农作物生长影响的研究进展》综述了不同微塑料对农作物生长发育及生理指标的影响规律,以及微塑料与重金属及有机物复合污染对农作物产生的毒性效应机制,为农田土壤微塑料污染的生态风险评估及治理防控提供科学依据。期待本专栏能够从农作物增产高效耕作方式创新、农田作物系统生态风险防控等方面为粮食作物安全生产相关领域的研究者提供参考。

耕作方式对旱作区麦-玉轮作体系小麦产量、氮素利用和土壤硝态氮残留的影响

方保停^{1,2},李友军¹,闫广轩³,李向东²,任开明¹,胡川¹,
周起辉¹,董誓言²,赵凯男¹,黄明¹,程红建²

(1.河南科技大学 农学院,河南 洛阳 471023;2.河南省农业科学院 小麦研究所;河南省小麦产量-品质协同提升工程研究中心,郑州 450002;3.河南师范大学 环境学院,河南 新乡 453007)

摘要:为筛选适合黄河中游旱作区麦-玉轮作体系小麦生产的耕作方式,2019年10月至2022年6月在洛阳市小浪底镇进行定位试验,设置深松(SS)、翻耕(PT)和旋耕(RT)3种耕作方式,研究了小麦产量特性,氮素积累分

收稿日期:2024-01-06;修回日期:2024-02-19.

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2300800;2022YFD1800700);河南省农业科学院创新团队建设项目(2024TD07).

作者简介:方保停(1976-),男,河南淮滨人,河南省农业科学院研究员,博士,研究方向为小麦高产优质高效栽培理论与技术,E-mail:fangbaoting@126.com.

通信作者:李友军,E-mail:kdlyj@haust.edu.cn;闫广轩,E-mail:guangxuan.yan@htu.edu.cn.

引用本文:方保停,李友军,闫广轩,等.耕作方式对旱作区麦-玉轮作体系小麦产量、氮素利用和土壤硝态氮残留的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2024,52(5):1-9.(Fang Baoting, Li Youjun, Yan Guangxuan, et al. Effects of tillage methods on wheat yield, N utilization and soil nitrate-N residue in dryland wheat-maize rotation system[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2024, 52(5): 1-9. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.01.06.0003.)

配转运特性及利用效率和0~200 cm 土层硝态氮残留量。3年中SS较RT和PT显著提高了产量、穗数和穗粒数,但降低了千粒质量。PT较RT提高产量和穗数,但对穗粒数和千粒质量的影响存在年际差异。SS不仅增加了越冬至成熟期各时期的地上部氮素积累量,而且可提高花前氮素转运量及其对籽粒氮素的贡献率,最终使蛋白质产量较RT和PT分别提高17.90%~23.56%和7.92%~12.98%,氮肥偏生产力提高5.63%~15.89%和3.09%~11.00%,成熟期0~200 cm 土壤硝态氮残留量显著降低7.39%~21.24%和4.76%~23.04%。综上,SS不仅能提高小麦产量,而且能促进氮素积累、转运和利用,降低土壤硝态氮残留量,是黄河中游旱作麦-玉轮作区实现小麦高产高效和环境友好的耕作方式。

关键词: 耕作方式;旱地麦-玉轮作;小麦;氮素利用;硝态氮残留

中图分类号: S512.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-2367(2024)05-0001-09

小麦为人类提供了20%的蛋白质,是世界1/3居民的主要口粮^[1]。旱作区是小麦生产的主要阵地,世界上有75%的小麦种植在旱作区,中国也达到了1/3^[2],因而旱作区小麦生产在保障粮食安全中具有重要作用。近年来,我国小麦单产和总产逐年提高,但依然存在耕作栽培管理不科学,产量和肥料利用效率低而不稳^[3],土壤硝态氮高量残留^[4]等问题,特别是在小麦生产受自然条件影响更大的旱作区表现尤为突出。因此,优化耕作栽培措施以提高旱作区小麦产量,改善氮素利用特性和降低硝态氮残留,对小麦生产实现高产高效环境友好意义重大。

已有的研究普遍表明,不同耕作方式对土壤的扰动土层和作用深度不同,在小麦产量形成和氮素吸收利用中发挥的作用也不同,最终会调控土壤硝态氮累积分布^[5]。旋耕深度较浅,会造成犁底层上移,不利于小麦根系生长、地上部的生长发育和氮素吸收利用,易致使硝态氮高量残留^[6]。翻耕灭草效果优异,但易造成耕作下垫层土壤紧实、加速土壤养分矿化,甚至破坏土壤团粒结构,从而影响小麦根系发育和养分吸收利用,降低地上部氮素积累量和转运效率,长期翻耕已经产生了明显的生产负效应^[7]。多数研究表明,深松耕作改土增产降低硝态氮残留的效果优异。郑侃等^[8]的Meta分析结果发现,与旋耕相比,深松可使中国北方地区小麦增产10.1%,且隔一年或两年深松一次即可获得较好的效果。汪洪涛等^[9]也发现,夏季深松能够提高小麦成熟期地上部氮素积累转运特性,在增加穗数的同时稳定穗粒数和千粒质量,从而显著提高产量。亦有研究表明^[10],深松在提高小麦产量的同时还能增加氮素积累量以及氮素利用效率,降低土壤硝态氮残留量,优化硝态氮分布。然而,耕作措施对小麦生产和氮素吸收利用的影响效应因水分条件而异。如ZHAO等^[11]研究发现,适量灌溉下深松提高小麦氮素吸收利用率的作用优于雨养。

冬小麦-夏玉米(简称麦-玉)轮作是我国北方地区的主要种植制度,也是旱作区的主要种植制度。通常,旱作麦-玉轮作生产区域年降水600 mm左右,不能满足两季作物生产的水分需求。这种水分不足会导致耕作栽培作用得不到充分发挥,限制了作物产量形成和养分吸收利用^[12]。近年来,随着我国高标准农田建设的推进,许多旱作麦-玉轮作种植区能实现小麦季进行一次灌溉^[13]。本课题组前期研究表明^[10],返青后一次灌溉能够提高小麦地上部氮素积累和氮素内效率,还能降低0~200 cm 土层硝态氮积累量,从而提高小麦籽粒产量。然而,前人关于耕作方式对小麦氮素养分吸收利用的研究较多,但有关耕作方式对于旱作区一次灌溉下麦-玉轮作体系小麦产量、氮素吸收利用和土壤硝态氮残留影响的研究仍鲜见报道。黄河横贯我国东、中、西三大地区,在经济开发和环境安全领域有着非常关键的战略地位。黄河流域要实现自然资源环境保护与高效开发必须重视创新驱动,坚持科技创新的核心地位^[14]。因此,本研究在黄河中游南岸典型旱作麦-玉轮作种植区,连续3年设置大田定位耕作试验,研究不同耕作方式对小麦产量、氮素积累分配转运利用和0~200 cm 土壤硝态氮残留量的影响,为旱作区麦-玉轮作下通过耕作优化实现小麦高产、高效和环境友好生产,推进黄河流域生态高质量发展提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2019年10月至2022年6月在黄河中游南岸的典型旱作小麦种植区(河南省洛阳市孟津区小浪底镇明达村)进行。该地年平均气温14.6℃,无霜期约为235 d,年日照时数为约2 270 h,平均降水量577.7 mm,

6月至9月降雨占年降雨量的60%，试验期间具体的降水量如图1。为便于对照，图1中也列出了近20年平均降水量。土壤为重壤土，2019年10月试验开始时，0~20 cm土层pH 7.6，田间最大持水量27.4%，容重 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，含有机质1.47%，全氮0.11%，有效磷 $9.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，速效钾 $139.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计及田间管理

试验设置旋耕(RT)、翻耕(PT)和深松(SS)3种耕作方式。其中，旋耕是用东方红1GS-230型旋耕机作业两遍，深度12~15 cm；翻耕是用东方红1L-525型铧犁翻耕(30~35 cm)后旋耕一遍；深松是用深松机耕作(35~40 cm)后旋耕(10~15 cm)一遍。所有耕作均在播前3~5 d进行，其中旋耕和翻耕按照当地习惯每年都进行；深松依据前期的研究结果采用隔年深松的方式，非深松年份采用旋耕，本试验中2019—2020和2021—2022年度深松，2020—2021年度旋耕。小区面积 24.5 m^2 ，3次重复。每个生长季返青后(2月底)，采用测墒补灌的方法计算灌溉量进行灌溉，全生育期只进行一次灌溉，具体灌溉控制策略、灌溉量和灌溉时间见文献[13]。氮肥(N) $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷肥(P_2O_5) $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、钾肥(K_2O) $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其中，50%氮肥于返青后灌溉时追施，其余肥料在旋耕前均匀撒施。小麦品种洛旱22，分别于2019年10月21日、2020年10月24日、2021年10月26日播种，3年播量均为 $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。病虫害防治同当地高产田。

1.3 测试内容与与方法

1.3.1 籽粒产量及其构成要素

在成熟期，各小区随机测定4个1 m双行的穗数并换算出公顷穗数；随机取50个穗子测定穗粒数和千粒质量。同时，随机取4个1 m×1 m小麦样本，风干后脱粒、称重并测定风干籽粒含水量。籽粒产量以12.5%含水量折算。

1.3.2 植株氮素积累、转运、分配、利用

在2020—2021、2021—2022年度，分别于小麦越冬、拔节、开花和成熟期，在各小区选择具有代表性的植株30~50株，越冬、拔节前不分样，开花期分成茎叶鞘(简称茎叶)和穗，成熟期分成茎叶、籽粒、穗轴+颖壳，及时杀青并烘干、称重、粉碎。全氮含量采用硫酸-双氧水法消解至透亮，将消解液定容100 mL后过滤，使用连续流动分析仪(AA3, SEAL公司, 德国)测定滤液中氮质量浓度，然后计算全氮含量($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

氮素积累、转运、分配、利用效率的计算方法如下^[10-11]。

某一器官氮素积累量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)为该器官干物质与其全氮含量的积，地上部氮素积累量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)是所有部位氮素积累量之和。

氮素分配比率=(器官氮素积累量/地上部氮素积累量)×100%；

花前氮素转运量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)=开花期地上部氮素积累量-成熟期营养器官氮素积累量；

花前转运氮素对籽粒氮素的贡献率=(花前氮素转运量/成熟期籽粒氮素积累量)×100%；

花后氮素积累量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)=成熟期地上部氮素积累量-开花期地上部氮素积累量；

花后积累氮素对籽粒氮素的贡献率=(花后氮素积累量/成熟期籽粒氮素积累量)×100%；

氮收获指数=(成熟期籽粒氮素积累量/成熟期地上部氮素积累量)×100%。

氮素内在效率($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=籽粒产量/成熟期地上部氮素积累量；

氮肥偏生产力($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=籽粒产量/施氮量；

每生产100 kg籽粒氮素需求量($\text{kg} \cdot (100 \text{ kg})^{-1}$)=成熟期地上部氮素积累量/(籽粒产量×100)；

蛋白质产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)=籽粒干物质质量×籽粒全氮含量×5.7。

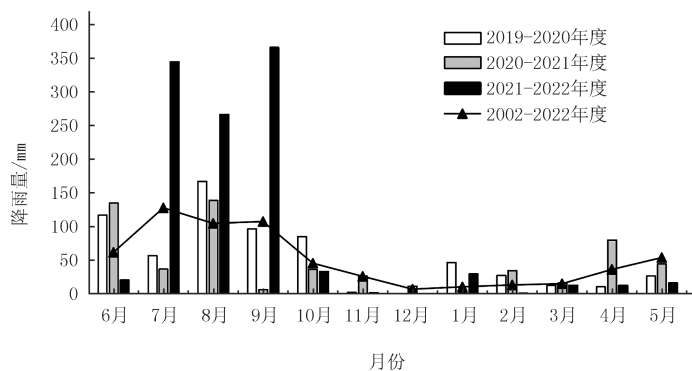


图1 2019年6月至2022年5月逐月降水量

Fig.1 Monthly precipitation of experimental field from June 2019 to May 2022

1.3.3 土壤硝态氮残留

于小麦收获后 3 d 内,各小区取 0~200 cm 土样,每 20 cm 为一层,充分混合后留取 300 g 左右作为样品并采用重量法测定土壤含水量,然后,参照 DAI 等^[15]描述的方法测定样品中硝态氮含量并计算硝态氮残留量。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 处理数据和作图,采用 SPSS18.0 进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 耕作方式对旱作区麦-玉轮作体系小麦产量特性的影响

3 年中,耕作方式对旱作区麦-玉轮作体系小麦产量及其构成因素均有显著调控效应(表 1)。3 年中小麦产量和穗数由大到小均表现为 SS、PT、RT。SS 较 PT 和 RT 多表现为显著增加,但 PT 和 RT 间差异不显著,其中,SS 较 PT 前后 3 年度分别增产 11.01%、3.07% ($P > 0.05$) 和 5.91%,较 RT 分别增产 15.87%、5.62% 和 7.10%,第二年度增产幅度较小;SS 的穗数较 PT 分别增加 4.52%、3.58% ($P > 0.05$) 和 6.57%,较 RT 分别显著增加 6.59%、6.61% 和 11.51%。不同耕作方式对穗粒数和千粒质量的影响在不同年份表现不同,SS 的穗粒数较 PT 增幅不显著,较 RT 除 2021—2022 年度外均表现为显著增加,而千粒质量除 2019—2020 年度较 RT 显著降低 9.24% 外均无显著差异。与 RT 相比,PT 的穗粒数在 2019—2020 年度和 2020—2021 年度分别增加 17.00% 和 7.49%,千粒质量 3 年中均无显著变化。

表 1 耕作方式对旱作区麦-玉轮作体系小麦产量特性的影响

Tab. 1 Effects of tillage methods on yield traits of wheat in dryland winter wheat-summer maize rotation system

年度	处理	产量/(kg·hm ⁻²)	穗数/(10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数	千粒质量/g
2019—2020	SS	7 667.06±114.66a	599.73±5.63a	31.23±0.32a	34.45±0.73b
	PT	6 906.80±92.94b	573.80±4.13b	29.46±1.00a	36.41±0.36ab
	RT	6 616.75±231.81b	562.66±6.13b	25.18±0.92b	37.96±0.49a
2020—2021	SS	8 335.34±79.49a	597.29±7.02a	42.31±0.96a	39.67±0.46a
	PT	8 086.91±62.15ab	576.62±8.37ab	41.15±0.80ab	40.82±0.76a
	RT	7 891.51±72.99b	560.28±4.16b	38.28±1.08b	41.59±0.77a
2021—2022	SS	7 978.57±54.89a	621.97±11.76a	52.35±0.93a	42.12±0.71a
	PT	7 533.40±80.81b	583.62±7.95b	50.95±0.90a	40.96±0.22a
	RT	7 449.54±55.73b	557.77±5.20b	51.26±0.46a	40.66±1.03a

注:数据后不同小写字母表示同一年度内处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

2.2 耕作方式对旱作区麦-玉轮作体系小麦地上部氮素积累分配转运的影响

2.2.1 对氮素积累量的影响

图 2 显示 2020—2021、2021—2022 两年度中各生育时期地上部氮素积累量由大到小总体呈现为 SS、PT、RT。从两年均值来看,与 RT 相比,PT 在越冬、拔节、开花和成熟期分别提高 16.43%、-0.12% ($P > 0.05$)、8.42% 和 6.58%,SS 分别显著提高 13.86%、9.44%、13.58% 和 12.96%;与 PT 相比,SS 在越冬期降低 4.84%,在拔节、开花和成熟期分别提高 9.58%、4.01% 和 5.53%。说明 SS 对旱作区麦-玉轮作体系小麦氮素积累有促进作用。

2.2.2 对器官氮素分配的影响

小麦成熟期地上部氮素积累量由大到小表现为籽粒、茎叶、穗轴+颖壳,且耕作方式对氮素积累量和分配比例的调控作用因器官而异(表 2)。2020—2021、2021—2022 两年度中 SS 的籽粒氮素积累量及其分配比例(氮收获指数)均最高,较 PT 前后两年度分别显著提高 8.01%~10.21% 和 2.84%~3.95%,较 RT 分别提高 17.89%~19.83% 和 5.00%~5.89%。SS 的穗轴+颖壳氮素积累量均最高,较 PT 提高 12.68%~17.29%,较 RT 提高 12.27%~14.10%。与 RT 相比,PT 的籽粒氮素积累量显著提高 8.37%~9.15%,而穗轴+颖壳氮素分配比例显著降低 6.37%~9.21%,但二者间的茎叶氮素积累量和分配比例、穗轴+颖壳氮素积累量和

籽粒氮素分配比例均无显著差异。

2.2.3 对氮素转运的影响

如表 3 所示,2020—2021、2021—2022 两年度间 SS 均保持了最高花前氮素转运量和花后氮素积累量,其中,花前氮素转运量较 PT 前后两年度分别提高 7.99%和 7.46%,较 RT 显著提高 21.27%和 25.50%;花后氮素积累量较 PT 分别提高 18.49%和 10.88%,较 RT 分别提高 15.16%和 2.33%。与 RT 相比,PT 的花前氮素转运量提高 12.29%~13.09%,但花后氮素积累量降低 2.81%~7.71%。两年度中,不同耕作方式下小麦花前氮素对籽粒的贡献率由大到小均表现为 PT、SS、RT,而花后氮素对籽粒的贡献率由大到小则表现 RT、SS、PT,但各处理间差异不显著。

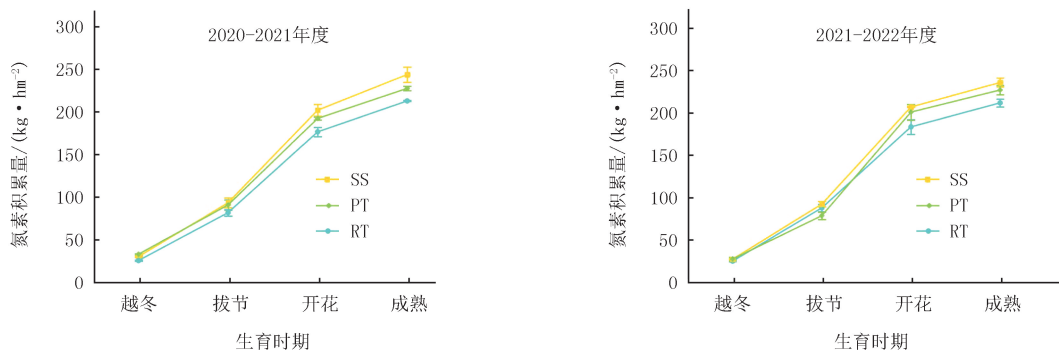


图2 耕作方式对旱作区麦-玉轮作体系小麦地上部氮素积累量的影响

Fig.2 Effects of tillage methods on aboveground nitrogen accumulation of wheat in dryland winter wheat-summer maize rotation system

表 2 耕作方式对旱作区麦-玉轮作体系不同器官氮素分配的影响

Tab. 2 Effects of tillage methods on nitrogen distribution in different organs of wheat in dryland winter wheat-summer maize rotation system

年度	处理	茎叶		穗轴+颖壳		籽粒	
		积累量/(kg·hm ⁻²)	比例/%	积累量/(kg·hm ⁻²)	比例/%	积累量/(kg·hm ⁻²)	比例/%
2020—2021	SS	35.21±2.41a	14.43±0.60b	24.52±1.00a	10.05±0.37a	184.29±4.42a	75.50±1.48a
	PT	38.80±1.73a	17.03±0.40a	21.76±0.65b	9.55±0.18b	167.22±4.38b	73.41±1.09a
	RT	37.42±2.35a	17.56±0.60a	21.84±1.81b	10.25±0.49a	153.79±5.16c	72.18±1.59a
2021—2022	SS	39.63±3.62a	16.79±0.66b	18.86±1.12a	8.01±0.37a	177.23±5.74a	75.19±1.54a
	PT	46.65±2.20a	20.56±0.45a	16.08±0.47b	7.09±0.20b	164.09±5.67b	72.33±1.15a
	RT	44.77±4.75a	21.16±1.36a	16.53±0.50b	7.81±0.20a	150.33±6.25c	71.01±2.06a

表 3 耕作方式对旱作区麦-玉轮作体系小麦地上部氮素积累转运特性的影响

Tab. 3 Effects of tillage methods on aboveground nitrogen accumulation and translocation and their contributions to grain of wheat in dryland winter wheat-summer maize rotation system

年度	处理	花前氮素转运量/	花前转运氮素对籽粒	花后氮素积累量/	花后氮素积累对籽粒的
		(kg·hm ⁻²)	贡献率/%	(kg·hm ⁻²)	贡献率/%
2020—2021	SS	142.52±5.28a	77.28±1.35a	41.77±1.77a	22.66±0.85a
	PT	131.97±2.35ab	78.92±1.30a	35.25±2.33a	21.10±1.53a
	RT	117.52±3.27b	76.41a±2.10a	36.27±3.21a	23.58±2.10a
2021—2022	SS	148.28±1.30a	83.69±1.42a	28.94±2.75a	16.30±1.42a
	PT	137.98±4.821ab	84.04±1.54a	26.10±2.1a	15.95±1.54a
	RT	122.04±6.83b	81.05±2.41a	28.28±2.85a	18.94±2.41a

2.3 耕作方式对旱作区麦-玉轮作体系小麦氮素效率和籽粒蛋白质产量的影响

从表 4 可以看出,SS 较 PT 和 RT,小麦氮素内在效率总体呈下降趋势,在 2020—2021、2021—2022 年度较 PT 降幅不显著,较 RT 分别显著降低 7.72%和 3.86%,而每生产 100 kg 籽粒氮素需求量呈相反规律。3 年度中氮肥偏生产力和籽粒蛋白质产量由大到小均表现为 SS、PT、RT,其中氮肥偏生产力较 PT 和 RT 分

别增加 3.09%~11.00% 和 5.63%~15.89%，蛋白质产量分别显著增加 7.92%~12.98% 和 17.90%~23.56%。与 RT 相比，PT 的氮肥偏生力增幅不显著，但蛋白质产量前后 3 年度分别显著增加 9.36%、8.74% 和 9.23%。可见，SS 利于提高小麦氮肥偏生产力和蛋白质产量，但会降低氮素内在效率，因而每生产 100 kg 籽粒氮素需求量有所提高。

表 4 耕作方式对旱作区麦-玉轮作体系小麦氮素效率和籽粒蛋白质产量的影响

Tab. 4 Effects of tillage methods on nitrogen efficiency and grain protein yield of wheat in dryland winter wheat-summer maize rotation system

年度	处理	氮素内在效率/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	每生产 100 kg 籽粒氮素 需求量/($\text{kg} \cdot (100 \text{ kg})^{-1}$)	氮肥偏生产力/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	蛋白质产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
2019—2020	SS	31.76±0.48a	3.14±0.04a	42.59±0.63a	982.64±24.11a
	PT	31.41±0.44a	3.18±0.04a	38.37±0.49b	869.73±25.31b
	RT	31.84±0.95a	3.14±0.09a	36.75±1.29b	795.29±35.51b
2020—2021	SS	34.17±0.71b	2.90±0.06a	46.31±0.42a	1 050.12±13.66a
	PT	35.50±0.40ab	2.81±0.03ab	44.92±0.34b	953.28±14.61b
	RT	37.03±0.38a	2.70±0.02b	43.84±0.41b	876.63±8.63c
2021—2022	SS	33.85±0.21b	2.95±0.01a	44.32±0.31a	1 009.98±7.18a
	PT	33.21±0.26ab	3.01±0.02ab	41.85±0.43b	935.68±25.77b
	RT	35.21±0.70a	2.84±0.05b	41.38±0.32b	856.58±16.94c

2.4 耕作方式对旱作区麦-玉轮作体系小麦收获期 0~200 cm 土层硝态氮残留影响

由图 3 可知，不同耕作方式对土壤硝态氮残留量具有显著调控效应，且偏干旱的 2019—2020 和 2020—2021 年度随着土层深度的增加呈 S 型变化趋势。2019—2020、2020—2021 年度土壤硝态氮主要集中在 80~160 cm 土层，SS 土壤硝态氮残留量较 PT 分别下降 27.47% 和 16.50%，较 RT 下降 29.05% 和 18.68%。分析 0~200 cm 土层硝态氮残留量发现，前后 3 年度 SS 较 PT 分别下降 9.75%、4.54% 和 18.27%，较 RT 显著下降 12.18%、6.88% 和 18.72%。说明，SS 利于降低旱作区麦-玉轮作体系麦田土壤硝态氮残留量，且对中土层土壤的影响幅度更大。PT 较 RT 对 0~200 cm 多数土层的土壤硝态氮残留量的调控效应因年度而异，在 2019—2020、2020—2021 年度表现为降低，而在 2021—2022 年度则表现出相反趋势。

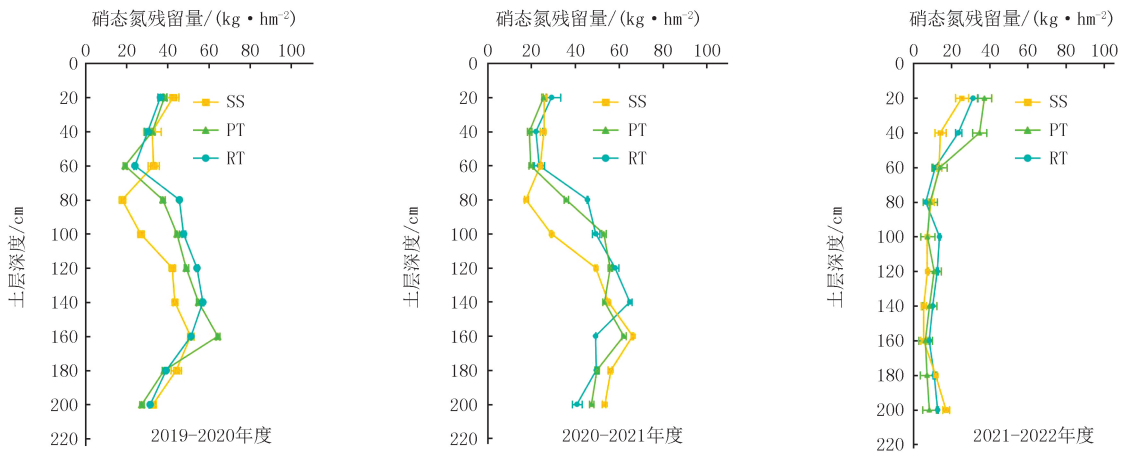


图 3 不同耕作方式对豫西旱作区麦-玉轮作体系小麦收获期土壤硝态氮残留量的影响

Fig. 3 Effects of tillage methods on the nitrate residue at wheat harvest in dryland winter wheat-summer maize rotation

3 讨论

3.1 耕作方式对旱作区玉-麦轮作体系小麦产量的影响

合理耕作是实现旱作小麦高产的重要途径。前人研究表明，深松在不同种植区域多表现出增产效应^[16]，

且深松增产与其优化了产量构成因素有关.在黄土旱塬的研究表明,隔年深松在干旱和丰水年型下均可以提高小麦籽粒产量^[17].在黄淮海南部砂姜黑土区的研究发现,与旋耕相比,深松显著改变了土壤理化性质,促进了干物质积累转运,从而提高穗数(3.80%)和穗粒数(18.80%),最终显著增产22.00%^[18].王小彬等^[19]指出,深松利于增加土壤养分,促进小麦生长发育,增加小麦成穗数和穗粒数,从而增加小麦产量.WANG等^[20]在拔节期一次灌溉条件下的研究也表明,深松能促进小麦根系向深层生长,延缓根系衰老,提高小麦穗数,进而提高产量.本研究发现,深松相较于旋耕和翻耕3年中均能显著增加旱作区玉-麦轮作体系小麦籽粒产量,与前人结果多表现一致,这与本研究中深松提高了穗数和穗粒数有关,也可能与深松改善了土壤结构、土壤水分,促进了物质生产和产量形成有关,但其机理还有待进一步研究.此外,本研究中,深松的增产作用在第二年的效果弱于第一年,说明不深松的年份耕作效应会减弱,在生产中应重视这个问题,综合衡量产量和效益的平衡,统筹深松作业布局.

3.2 耕作方式对旱作区玉-麦轮作体系小麦氮素吸收利用的影响

如何促进植株氮素吸收积累转运从而提高氮素利用效率仍是当前小麦生产关注的重要课题.在山东麦-玉轮作区的研究表明,小麦播前深松能够提高土壤耕层团聚体稳定性,提高小麦关键生育时期地上部氮素积累量和氮素转运利用效率^[21].在山西旱塬的研究表明,休闲期深松能提高小麦拔节期氮素积累量以及开花后地上部各营养器官向籽粒的氮素转运量^[22],降低成熟期叶片氮素积累量,从而提高籽粒氮素在整株中的分配比例,最终显著提高氮素利用效率^[23].前人研究也表明,深松能提高小麦主要生育时期地上部氮素积累量,并促进营养器官氮素向籽粒的转运^[9].本研究发现,深松较翻耕和旋耕有利于提高小麦越冬至成熟期氮素积累量,最终显著提高籽粒氮素积累量及其占成熟期地上部氮素积累量的比例,但茎叶氮素积累量及其分配比例在不同试验年度表现不同,这可能与降雨量在不同试验年份存在差异有关.丁晋利等^[24]也发现,在干旱年份,深松较传统翻耕降低了茎叶氮素分配比例,促进了花后营养器官氮素向籽粒转运,最终显著提高籽粒氮素积累量.此外,由于深松能促进旱作区玉-麦轮作体系小麦地上部氮素积累、转运和利用,利于提高小麦籽粒氮素含量^[13].本研究也表明,深松较翻耕和旋耕利于提高旱作区玉-麦轮作体系小麦氮肥偏生产力和籽粒蛋白质产量,但因降低了氮素内在效率而提高了每生产100 kg籽粒氮素需求量.

3.3 耕作方式对旱作区玉-麦轮作体系土壤硝态氮残留的影响

作物收获后硝态氮残留不可避免,但若残留量超过阈值,既易挥发,也易淋溶而造成地下水污染,从而引起严重的生态环境问题^[25].前人研究表明,适宜的耕作方式降低土壤硝态氮残留量,有助于实现小麦环境友好生产^[26].在旱作区,黄明等^[10]发现深松因促进小麦氮素利用而降低0~200 cm土壤硝态氮残留量.围绕旱地冬小麦-夏玉米生产体系的研究也表明,深松较免耕和翻耕能提高小麦产量,降低土壤硝态氮残留量,优化不同土层硝态氮分布^[27].本研究也表明,3年中深松相较于传统翻耕和旋耕均能显著降低土壤硝态氮残留量,但在2019—2020和2020—2021年度的降幅更大,这是因为降雨对试验结果产生了影响,在播前3月总降雨量(997.9 mm)远超常年的2021—2022年度,耕作方式间土壤硝态氮残留只在0~60 cm存在差异,且60 cm以下土层残留量均较低,这也在从侧面验证了土壤硝态氮易淋溶至较深土层.

4 结 论

与翻耕和旋耕相比,深松不仅增加了小麦成穗数、穗粒数,使产量增加5.62%~15.87%,而且增加地上部氮素积累量,促进小麦营养器官花前氮素积累向籽粒的转运和花后氮素积累,从而使氮肥偏生产力和蛋白质产量显著提高,且使0~200 cm土层土壤硝态氮残留量分别降低8.82%和10.64%.因此,深松是适合豫西旱作玉-麦轮作区小麦高产高效且环境友好生产的耕作方式.

参 考 文 献

- [1] YAN S N, YU Z Y, GAO W, et al. Dissecting the genetic basis of grain color and pre-harvest sprouting resistance in common wheat by association analysis[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(9): 2617-2631.
- [2] ZHANG X, LI X H, LUO L C, et al. Monitoring wheat nitrogen requirement and top soil nitrate for nitrate residue controlling in drylands [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241: 118372.

- [3] 赵杰,林文,孙敏,等.休闲期深翻和探墒沟播对旱地小麦水氮资源利用的影响[J].应用生态学报,2021,32(4):1307-1316.
ZHAO J,LIN W,SUN M,et al.Effects of deep ploughing during the fallow period and soil moisture-based furrow sowing on water and nitrogen utilization of dryland wheat[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(4):1307-1316.
- [4] 李自林.我国农业面源污染现状及其对策研究[J].干旱地区农业研究,2013,31(5):207-212.
LI Z L.Review of the current situation and control countermeasures in agricultural non-point source pollution control in China[J].Agricultural Research in the Arid Areas,2013,31(5):207-212.
- [5] 杨东,刘晓霞,陈红金,等.定额制施肥对土壤及生态环境影响的研究[J].中国农学通报,2023,39(32):91-98.
YANG D,LIU X X,CHEN H J,et al.Effect of quota-based fertilization on soil and ecological environment:research progress[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2023,39(32):91-98.
- [6] 王科,李浩,邓劲松,等.不同耕作施肥方式对稻茬小麦氮素利用及土壤容重的影响[J].四川农业大学学报,2020,38(6):654-660.
WANG K,LI H,DENG J S,et al.Effects of different tillage and fertilization methods on nitrogen utilization and soil bulk density in rice-wheat rotation system[J].Journal of Sichuan Agricultural University,2020,38(6):654-660.
- [7] YIN W,FAN Z L,HU F L,et al.No-tillage with straw mulching boosts wheat grain yield by improving the eco-physiological characteristics in arid regions[J].Journal of Integrative Agriculture,2023,22(11):3416-3429.
- [8] 郑侃,何进,李洪文,等.中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的 Meta 分析[J].农业工程学报,2015,31(22):7-15.
ZHENG K,HE J,LI H W,et al.Meta-analysis on maize and wheat yield under subsoiling in Northern China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(22):7-15.
- [9] 汪洪涛,赵凯男,张军,等.深耕时间和方式对旱地麦-玉复种体系小麦产量形成的影响[J].华北农学报,2023,38(2):139-148.
WANG H T,ZHAO K N,ZHANG J,et al.Effects of time and method of deep tillage on yield formation of wheat in dryland wheat-maize multiple cropping system[J].Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2023,38(2):139-148.
- [10] 黄明,吴金芝,李友军,等.耕作方式和氮肥用量对旱地小麦产量、蛋白质含量和土壤硝态氮残留的影响[J].中国农业科学,2021,54(24):5206-5219.
HUANG M,WU J Z,LI Y J,et al.Effects of tillage practices and nitrogen fertilizer application rates on grain yield,protein content in winter wheat and soil nitrate residue in dryland[J].Scientia Agricultura Sinica,2021,54(24):5206-5219.
- [11] ZHAO K N,WANG H T,WU J Z,et al.One-off irrigation improves water and nitrogen use efficiency and productivity of wheat as mediated by nitrogen rate and tillage in drought-prone areas[J].Field Crops Research,2023,295:108898.
- [12] 李荣,鄢慧芳,张龙,等.不同耕作措施对宁南地区土壤物理性质及作物产量的影响[J].中国农业科学,2023,56(18):3543-3555.
LI R,YAN H F,ZHANG L,et al.Effects of different tillage practices on soil physical properties and crop yield in the region of southern Ningxia[J].Scientia Agricultura Sinica,2023,56(18):3543-3555.
- [13] 赵凯男,吴金芝,黄明,等.返青后补灌与氮肥用量对旱地小麦产量及水氮利用效率的影响[J].中国农业科学,2023,56(17):3383-3398.
ZHAO K N,WU J Z,HUANG M,et al.Effects of supplemental irrigation after regreening and nitrogen fertilizer application rates on wheat yield,water and nitrogen use efficiency in dryland[J].Scientia Agricultura Sinica,2023,56(17):3383-3398.
- [14] 何楠,李贵成.科技赋能黄河流域生态保护和高质量发展[EB/OL].[2023-12-10].https://newspaper.dahe.cn/hnrb/html/2022-05/25/content_19_88342.htm.
- [15] DAI J,WANG Z H,LI F C,et al.Optimizing nitrogen input by balancing winter wheat yield and residual nitrate-N in soil in a long-term dryland field experiment in the Loess Plateau of China[J].Field Crops Research,2015,181:32-41.
- [16] 黄明,王朝辉,罗来超,等.垄覆沟播及施肥位置优化对旱地小麦氮磷钾吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(5):1158-1168.
HUANG M,WANG Z H,LUO L C,et al.Effects of ridge mulching,furrow seeding,and optimized fertilizer placement on NPK uptake and utilization in dryland wheat[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2018,24(5):1158-1168.
- [17] 于琦,李军,周栋,等.不同降水年型黄土旱塬冬小麦免耕与深松轮耕蓄墒增收效应[J].中国农业科学,2019,52(11):1870-1882.
YU Q,LI J,ZHOU D,et al.Effects of No-tillage/subsoiling rotational tillage system on increasing soil water storage and crop yield under different precipitation patterns of winter wheat in the Loess Plateau[J].Scientia Agricultura Sinica,2019,52(11):1870-1882.
- [18] 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 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.
- [19] 王小彬,蔡典雄,金轲,等.旱坡地麦田夏闲期耕作措施对土壤水分有效性的影响[J].中国农业科学,2003,36(9):1044-1049.
WANG X B,CAI D X,JIN K,et al.Water availability for winter wheat affected by summer fallow tillage practices in sloping dryland[J].Scientia Agricultura Sinica,2003,36(9):1044-1049.
- [20] WANG J F,WANG Z Z,GU F X,et al.Tillage and irrigation increase wheat root systems at deep soil layer and grain yields in lime concretion black soil[J].Scientific Reports,2021,11:6394.
- [21] 赵艳,罗铮,杨丽,等.氮肥运筹对稻茬小麦氮素转运、干物质积累、产量及品质的影响[J].麦类作物学报,2022,42(8):1001-1011.

- ZHAO Y, LUO Z, YANG L, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on nitrogen translocation, dry matter accumulation, yield and quality of wheat after rice[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(8): 1001-1011.
- [22] RAO S C, DAO T H. Nitrogen placement and tillage effects on dry matter and nitrogen accumulation and redistribution in winter wheat [J]. *Agronomy Journal*, 1996, 88(3): 365-371.
- [23] 雷妙妙, 孙敏, 高志强, 等. 休闲期深松蓄水适期播种对旱地小麦产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(15): 2904-2915.
LEI M M, SUN M, GAO Z Q, et al. Effects of subsoiling during the fallow period and timely sowing on water storage and wheat yield of dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(15): 2904-2915.
- [24] 丁晋利, 武继承, 杨永辉, 等. 长期保护性耕作对冬小麦氮素积累和转运的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 240-246.
DING J L, WU J C, YANG Y H, et al. Effects of long-term conservation tillage on nitrogen accumulation and translocation of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2): 240-246.
- [25] ZHOU J Y, GU B J, SCHLESINGER W H, et al. Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25088.
- [26] 李爽, 李文娜, 关皓月, 等. 耕作方式对豫西旱地麦-豆轮作土壤理化特性和酶活性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(6): 168-178.
LI S, LI W N, GUAN H Y, et al. Effects of tillage methods on soil physical and chemical properties and enzyme activities in wheat-soybean rotation filed in dryland of western Henan Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(6): 168-178.
- [27] 吴金芝, 汪洪涛, 侯园泉, 等. 提升雨养夏玉米-冬小麦两熟体系生产力和土壤硝态氮累积的最优耕作模式[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(4): 614-627.
WU J Z, WANG H T, HOU Y Q, et al. Optimum tillage pattern with high crop productivity and soil nitrate-N accumulation in rain-fed summer maize and winter wheat double cropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(4): 614-627.

Effects of tillage methods on wheat yield, N utilization and soil nitrate-N residue in dryland wheat-maize rotation system

Fang Baoting^{1,2}, Li Youjun¹, Yan Guangxuan³, Li Xiangdong², Ren Kaiming¹, Hu Chuan¹,
Zhou Qihui¹, Dong Shiyan², Zhao Kainan¹, Huang Ming¹, Cheng Hongjian²

(1. College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China; 2. Wheat Research Institute; Henan Province Engineering Research Center of Wheat Yield-Quality Simultaneous Improvement, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 3. College of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: In order to clarify the suitable tillage method for wheat production in wheat-maize rotation system in dryland of the midstream of Yellow River, a three-year experiment with three tillage methods, including rotary tillage(RT), subsoiling(SS), and plowing tillage(PT) was conducted at Xiaolangdi Town, Luoyang City from October 2019 to June 2022. The yield, and aboveground nitrogen(N) accumulation, distribution, transportation, and N utilization efficiency in wheat, and nitrate-N residue in the 0-200 cm soil layer were investigated. Over three years, compared with RT and PT, SS significantly increased wheat yield, number of spikes, and grains per spike but it decreased the 1 000-grain weight. Compared with RT, PT increased wheat yield and number of spikes, but the effects on 1 000-grain weight and grains per spike varied among years. Compared with RT and PT, SS not only increased the N accumulation in aboveground parts at various growth stages from overwintering to maturity stage of wheat, but also increased the pre-anthesis N transportation and its contribution to grains, thus ultimately significantly increased grain protein yield by 17.90%–23.56% and 7.92%–12.98%, the partial factor productivity for N fertilizer by 5.63%–15.89% and 3.09%–11.00%, however, it reduced the nitrate-N residue in the 0–200 cm soil layer by 7.39%–21.24% and 4.76%–23.04%, respectively. In summary, SS should be adopted as a suitable tillage method for simultaneously realizing high yield, high efficiency, and environment-friendly in wheat-maize rotation system in dryland of the mid-stream of Yellow River because it not only increased wheat yield, promoted the characteristics of aboveground N accumulation, transportation, and utilization parts, but also reduced soil nitrate-N residue.

Keywords: tillage methods; dryland wheat-maize rotation; wheat; N utilization; nitrate-N residue