

耕作方式和氮肥用量对旱地小麦产量、 水分利用效率和种植效益的影响

吴金芝, 黄明, 李友军, 付国占, 赵凯男, 侯园泉, 张振旺

(河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 为探索旱地小麦增产增效增收协同的耕作方式及其配套施氮技术。2016—2017(欠水年)和 2017—2018(丰水年)年度,在豫西典型旱区洛宁县设置夏闲期深松(ST,麦收后 2 周左右隔年进行)和翻耕(PT,传统的 7 月或底 8 月初连年进行)2 种耕作方式为主区,设置 4 个氮肥用量为副区(播前基施纯氮 0(N0), 120(N120), 180(N180), 240 (N240) kg/hm²)的田间定位试验,分析了土壤水分以及小麦产量、水分利用效率和种植效益。结果表明:与翻耕相比,深松提高了休闲效率,播前、开花期和成熟期 0—200 cm 土壤蓄水量分别提高 6.5%~11.7%, 5.0%~8.5%, 4.7%~8.2%,使欠水年的千粒重、丰水年的穗数和穗粒数显著提高($P<0.05$),从而使欠水年的产量和经济效益分别提高 7.1%~17.8%和 5.5%~30.2%,丰水年施氮处理的产量、水分利用效率和经济效益分别提高 10.2%~22.0%, 3.0%~13.0%, 16.1%~35.1%。增加氮肥用量有利于提高休闲效率,使播前土壤蓄水量翻耕下得到恢复、深松下显著提高($P<0.05$),小麦产量、水分利用效率和经济效益翻耕下 N180 最优,较其他处理分别提高 6.5%~43.9%, 8.1%~36.1%, 12.4%~61.3%;深松下欠水年以 N180 较优,丰水年以 N240 最优,且较其他处理分别提高 3.9%~67.9%, 1.0%~54.1%, 3.6%~95.8%。因此,麦收后 2 周左右隔年深松有利于提高土壤含水量,进而提高产量、水分利用效率和种植效益,且在欠水年配施纯氮 180 kg/hm²、丰水年配施纯氮 240 kg/hm²效果最优。研究结果可为提高旱地小麦产量、效率和效益提供理论依据和技术参考。

关键词: 旱地; 小麦; 深松; 氮肥用量; 籽粒产量; 水分利用效率; 种植效益

中图分类号: S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0264-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.036

Effects of Tillage Practices and Nitrogen Rates on Grain Yield, Water Use Efficiency and Planting Profit in Winter Wheat in Dryland

WU Jinzhi, HUANG Ming, LI Youjun, FU Guozhan,

ZHAO Kainan, HOU Yuanquan, ZHANG Zhenwang

(Agricultural College, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023)

Abstract: The objective of the present study was to explore the suitable combined pattern of tillage practice and nitrogen(N) rate for synchronously increasing the grain yield, water use efficiency and planting benefits in dryland wheat. In the dry year 2016—2017 and wet year 2017—2018, a field experiment was carried out in the typical dryland in western Henan province. In the experiment, the two tillage practices: Subsoiling tillage (ST) and conventional ploughing (PT), were set as the main treatment, and the four N fertilizer application rates of 0, 120, 180 and 240 kg/hm², expressed as N0, N120, N180 and N240, respectively, were set as secondary treatment. The subsoiling in ST was conducted about two weeks after the harvest of previous wheat every two years, and the ploughing in PT was carried out each year around late July to early August after once heavy rainfall. We tested the soil water content, yield and its components, water use efficiency and planting profit. Compared with PT, ST significantly enhanced rainfall fallow efficiency, and increased the water storage in 0—200 cm soil depth by 6.5%~11.7%, 5.0%~8.5% and 4.7%~8.2% respectively at pre-seeding, anthesis and maturity. Therefore, ST significantly enhanced the spike numbers and numbers per spike in the wet year and the 1000-grain weight in the dry year, and thus increased the grain yield and eco-

收稿日期: 2021-04-26

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300400, 2018FD0300707)

第一作者: 吴金芝(1978—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事旱地农田水肥高效及生理生态研究。E-mail: ywujz@126.com

通信作者: 黄明(1980—),男,博士,副教授,主要从事旱地小麦水肥高效及生理生态研究。E-mail: huangming_2003@126.com

李友军(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事旱作节水高产栽培理论与技术研究。E-mail: lyj@haust.edu.cn

conomic return by 7.1%~17.8% and 5.5%~30.2% in the dry year, and increased the grain yield, water use efficiency, economic return by 10.2%~22.0%, 3.0%~13.0% and 16.1%~35.1% in the wet year, compared with PT. With the increase of N rates, the rainfall fallow efficiency was significantly enhanced, resulting in that the water storage at pre-seeding was recovered in PT and significantly increased in ST. N180 was the optimal treatment in PT, and the grain yield, water use efficiency and economic return in N180 was 6.5%~43.9%, 8.1%~36.1% and 12.4%~61.3% higher than those of the other N rate treatments. Under the ST, the optimal N treatment was N180 in the dry year while N240 in the wet year, and the grain yield, water use efficiency and economic return in the optimal treatment was 3.9%~67.9%, 1.0%~54.1% and 3.6%~95.8% higher than those of the other N rate treatments. Above all, subsoiling at about two weeks after the harvest of previous wheat once every two years contributed to accumulating precipitation and increasing soil water storage, and thereby improving grain yield, water use efficiency and planting profit in dryland wheat, particularly with N rate at 180 kg/hm² in the dry year, and with N rate at 240 kg/hm² in the wet year. These results can provide a theoretical basis and technical reference for improving the grain yield, efficiency and profit in dryland wheat.

Keywords: dryland; winter wheat; subsoiling; N rates; grain yield; water use efficiency; planting benefit

旱地小麦占我国小麦播种面积 1/3,自然降水是其唯一水分来源。然而,在旱地小麦产区,50%~70%的降水集中在夏季,与小麦生长季错位,加上耕作栽培施肥管理相对粗放,致使小麦产量、水分利用效率和种植效益低下,严重影响了人们的种麦积极性和小麦产业的发展^[1]。因此,优化栽培措施以更好地蓄积并利用降水对促进旱地小麦产业发展具有重要意义。

在传统的旱地小麦生产中,为了防除杂草,人们广泛采用 7 月中下旬或 8 月初连年翻耕,致使耕作前(6—7 月)的降水不能有效地渗入土壤,加上耕作后地表裸露,不仅会导致 60%的降雨被无效蒸发^[2],而且后期若遇到强降雨会使地表结皮,阻碍降水的入渗,蓄水保墒功能变差。此外,连年翻耕所形成的犁底层,会阻碍降水向深层土壤入渗,增加根系下扎阻力,从而限制作物对土壤水分的利用和产量形成^[3-5]。已有研究^[3-8]表明,深松可打破犁底层,改善土壤孔隙分布,促进土壤蓄水,减少蒸发损失,增强根系活性,延缓植株的衰老,促进小麦物质生产,从而提高籽粒产量和水分利用效率。然而,在河北栾城地区连续 16 年旋耕后再深松却会显著减产^[9];在河南禹州的长期定位试验^[10]也发现,在欠水年,深松小麦水分利用效率较深翻降低 2.4%。可见,深松的增产增效功能还欠稳定,需要拓展性研究以进一步优化。氮肥是调控小麦产量、水分利用效率和种植效益的重要因子。熊淑萍等^[11]在河南砂姜黑土区的研究发现,深松配施氮肥 330 kg/hm²才能获得最高产,而翻耕和旋耕施氮 225 kg/hm²就能达到最高产。杨永辉等^[12]在河南省开封市的试验表明,深松较翻耕,施氮 120 kg/hm²时小麦产量和水分利用效率分别提高 19.0%和 8.1%,施氮 240 kg/hm²时产量增幅降至 6.2%,而水分利用效率的增幅却提高至 23.5%。在

晋南旱地,深松配施 150 kg/hm²时产量最佳^[13]。可见,深松与氮肥互作对小麦籽粒产量和水分利用效率的影响显著,但与深松匹配的氮肥用量在不同生产条件下并不相同。此外,深松的效应与耕作时间^[14]有关,深松与免耕轮耕具有较好的耕蓄墒增收效应^[15]。综上,尽管有关耕作方式和氮肥用量调控农田土壤水分和小麦产量的研究已有不少,但深松如何配施氮肥尚无定论,且多基于同时耕作或连年耕作条件下进行,关于耕作方式和氮肥用量互作调控小麦种植效益的研究也较少。因此,本研究在黄土高原南部和黄淮海平原交汇处的典型旱地小麦种植区,通过连续 2 年的定位田间试验,研究小麦收获后 2 周隔年深松和传统的 7 月底 8 月初连年翻耕及其配施不同氮肥用量对旱地麦田土壤水分以及小麦产量、水分利用效率和种植效益的影响,以期为旱地小麦高产高效增收栽培提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于河南省洛宁县小界乡梅窑村,位于黄土高原南部和黄淮海平原交汇处的典型旱作区,属于半湿润易旱区,海拔 350~550 m,年均气温 13.7 ℃,年均日照时间 2 217.6 h,年平均无霜期 216 天,年降水量 400~800 mm,60%降水集中于 7—9 月。冬小麦—夏休闲是当地的主要种植模式。试验开始前 0—20 cm 土层土壤含有机质、全氮含量分别为 11.3, 0.74 g/kg;碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为 37.6, 17.6, 128.3 mg/kg。试验期间的降水情况见图 1,前后 2 年度夏闲季降水量分别为 240, 492 mm,小麦生长季降水分别为 231, 186 mm,总降水分别为 471, 678 mm。按照国内常用的降水年型划分标准^[16]及当地长期的降水资料(2000—2018 年, (569±156)

mm), 年降水量>621 mm 为丰水年, 年降水量<518 mm 为欠水年, 介于二者之间为平水年, 2016—2017 年和 2017—2018 年度分别为欠水年和丰水年。

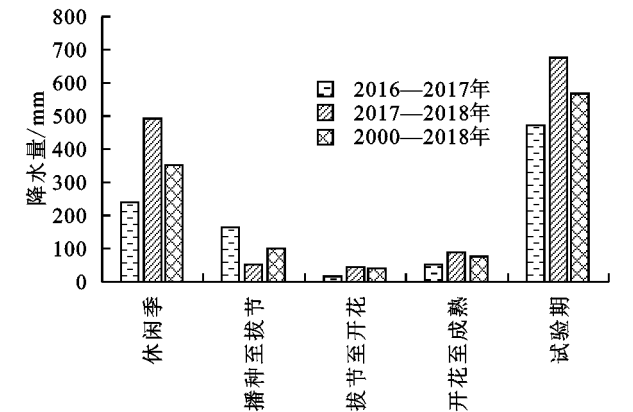


图 1 试验期间的降水量

1.2 试验设计和田间管理

试验采用二因素裂区设计, 主区为耕作方式, 设深松和翻耕 2 个水平, 副区为 4 个氮肥用量水平, 设施氮 0, 120, 180, 240 kg/hm², 分别用 N0、N120、N180 和 N240 表示。耕作处理在夏闲季进行, 即深松(ST): 前茬小麦收获时留秸秆全量还田、均匀覆盖地表, 麦收后 2 周左右使用深松机每间隔 35 cm 深松 (35±2)cm, 深松仅在 2016—2017 年度进行, 夏闲季不进行任何耕作作业; 翻耕(PT): 根据当地传统习惯, 7 月底或 8 月初降透雨后翻耕, 深度 (25±3)cm。本研究中于 2016 年 6 月 12 日深松, 2016 年 7 月 22 日和 2017 年 8 月 4 日翻耕。4 次重复, 小区面积 10 m×7.2 m=72 m²。所用肥料全部基施, 氮磷钾肥分别为尿素、过磷酸钙和硫酸钾, 小麦播前 3 天按试验设计人工将全部氮肥以及磷肥(P₂O₅) 75 kg/hm² 和钾肥(K₂O) 45 kg/hm² 均匀撒施于相应小区, 然后旋耕混入土壤。供试品种为“洛旱 22”, 播量为 187.5 kg/hm², 分别于 2016 年 10 月 10 日、2017 年 10 月 26 日播种, 2017 年 6 月 1 日、2018 年 6 月 4 日收获。其他管理按照当地丰产田进行。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤容重 于小麦播种前, 用环刀采集 0—20、20—40 cm 土层的样品, 采用重量法^[17] 测定土壤容重。

1.3.2 土壤蓄水量和小麦耗水量 于试验开始前、播种前、开花期和成熟期, 每 20 cm 为 1 层, 采集 0—200 cm 土样, 取约 30 g 样品 105 ℃ 烘 48 h 测定土壤含水量。按照孙敏等^[5] 描述的方法计算土壤蓄水量和小麦耗水量:

$$WS = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^n D_i H_i W_i$$
$$WC = WS_s - WS_h$$
$$WH = WS_s - WS_{ph}$$

$ET = WC_{200} + P + I + U - R - F$

式中: WS 为土壤蓄水量(mm), 下标字母 *i* 表示土层, 下标字母 *s*、*h* 和 *ph* 分别为播前、收获和试验开始前或前茬收获; *D* 为土壤容重(g/cm³), 0—20、20—40 cm 土层的 *D* 分别以表 2 中实测值计, 40—200 cm 土层的 *D* 以当地多点测定均值 1.45 计; *H* 为土层厚度(cm); *W* 为土壤质量含水量(%); *WC* 为生育期土壤耗水量(mm); *WH* 为休闲季土壤贮水量(mm); *ET* 为生育期作物耗水量(mm); *P* 为生育期降水量(mm); *I* 为灌溉量(mm); *U* 为地下水补给量(mm); *R* 为径流量(mm); *F* 为深层渗漏量(mm)。本试验地块为雨养旱地, 地势平坦, 土层深厚, 地下水埋深>100 m, 因此 *I*、*U*、*R*、*F* 均可忽略不计, 值为 0。

1.3.3 产量及其构成因素的测定 在成熟期, 从每个小区随机收割 4 个 1.0 m×1.0 m 样方, 混合后脱粒并称重。然后取籽粒 50 g 左右, 80 ℃ 烘至恒重, 测定籽粒含水量。籽粒产量以 12.5% 的含水量表示。同时, 从每个小区选 4 行长 50 cm 且有代表性的小麦, 测定穗数、穗粒数、千粒重和生物量。

1.3.4 收获指数、水分利用效率和种植效益的计算

收获指数=0.875×籽粒产量/生物量×100%

按孙敏等^[5] 描述的方法, 根据籽粒产量(*Y*) 和全生育期小麦耗水量(*ET*, mm) 计算水分利用效率(*WUE*), $WUE = Y/ET$ 。

根据休闲季土壤贮水量(*WH*) 和休闲季降雨量(*FP*) 计算休闲效率(*FE*, %), $FE = WH/FP$ 。

经济效益是小麦产量收入与总消耗(机械、农业材料、劳动力) 的差值^[1]。按小麦 2 年平均收购价 2.2 元/kg 计算产出, 以当地机械深松(600 元/hm²)、翻耕(600 元/hm²)、旋耕(450 元/hm²)、播种(300 元/hm²)、收获(600 元/hm²)、人工施肥(300 元/hm²)、夏季杂草防除(450 元/hm²)、麦季杂草防除(450 元/hm²)、农药(150 元/hm²)、种子(750 元/hm²) 等实际支出, 以及氮磷钾肥的平均价格 4.0、5.4、10.4 元/kg 计算投入。

成本收益率是经济效益和投入的比值^[1]。

1.4 统计分析

采用 DPS 7.05 软件进行统计分析, 用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 耕作方式和氮肥用量对旱地麦田土壤容重的影响

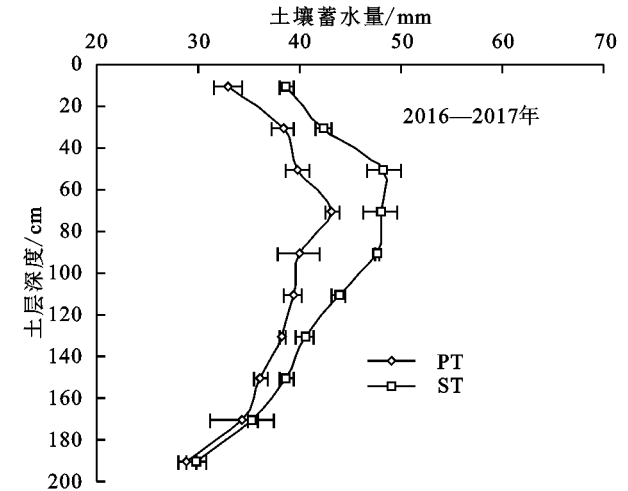
由表 1 可知, 深松与翻耕相比, 0—20 cm 土层的容重略有提高, 但增幅不显著($P>0.05$), 而 20—40 cm 的土壤容重在 2016—2017 年和 2017—2018 年度分别降低 10.9% 和 8.8%。

耕作方式	表 1 耕作方式对旱地小麦播前土壤容重的影响			
	单位:g/cm ³			
	2016—2017 年		2017—2018 年	
	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
PT	1.25a	1.47a	1.25a	1.48a
ST	1.26a	1.31b	1.30a	1.35b

注:同列不同小写字母表示相同年度不同处理间在 $P<0.05$ 水平显著差异。

2.2 耕作方式和氮肥用量对旱地麦田土壤蓄水量的影响

2 年中小麦播种前土壤蓄水量均呈现随土层加深先



增加后降低的趋势,但深松较翻耕均有显著提高播前底墒的作用($P>0.05$),且提高幅度和增墒土层因降雨年型而异(图 2)。欠水年深松可提高播前 0—160 cm 各土层土壤蓄水量,其中 0—100,100—200,0—200 cm 分别提高 16.5%,6.4%,11.7%;丰水年深松提高了 0—180 cm 各土层土壤蓄水量,其中 0—100,100—200,0—200 cm 土层土壤蓄水量分别提高 8.8%~11.4%,3.0%~7.0%,6.5%~8.4%。可见,麦收后 2 周左右隔年深松能有效提高旱地麦田播前底墒,且以偏早的年份和氮肥用量高时增加效果更佳。

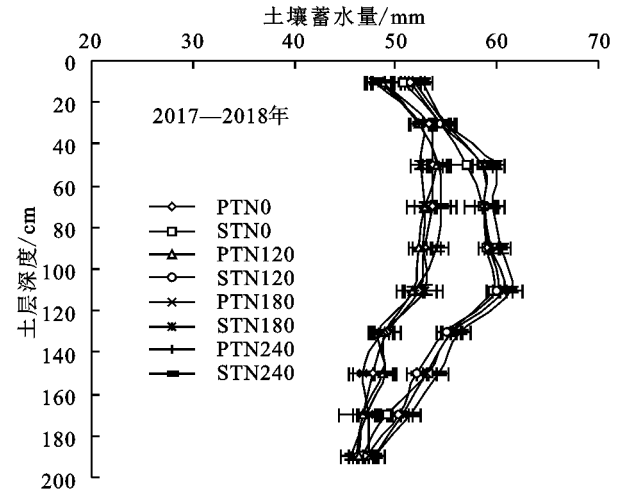


图 2 不同处理下旱地小麦播前 0—200 cm 土层土壤蓄水量

由图 3 可知,2 年中,耕作方式和氮肥用量对小麦开花期土壤蓄水量的影响规律相似。相同氮肥用量下,深松处理 0—100,0—200 cm 的土壤蓄水量较翻耕均显著提高,N0、N120、N180 和 N240 下欠水年分别提高 10.4%和 6.5%,11.4%和 7.6%,8.8%和 6.9%,9.9%和 8.4%,丰水年分别提高 7.7%和 6.0%,8.5%和 5.0%,13.2%和 8.5%,13.1%和 8.4%,欠水年 N0 和 N120 的增幅大,丰

水年 N180 和 N240 的增幅大。相同耕作方式下,0—200 cm 各土层的蓄水量均随氮肥用量的增加逐渐降低,但深松较翻耕的降幅小。与 N0 相比,N120、N180 和 N240 下 0—200 cm 土层土壤蓄水量翻耕下分别降低 4.2%,8.6%,10.9%,深松下分别降低 2.9%,6.5%,7.8%。说明深松的蓄水保墒作用在高氮肥用量导致作物耗水增加时更突出。

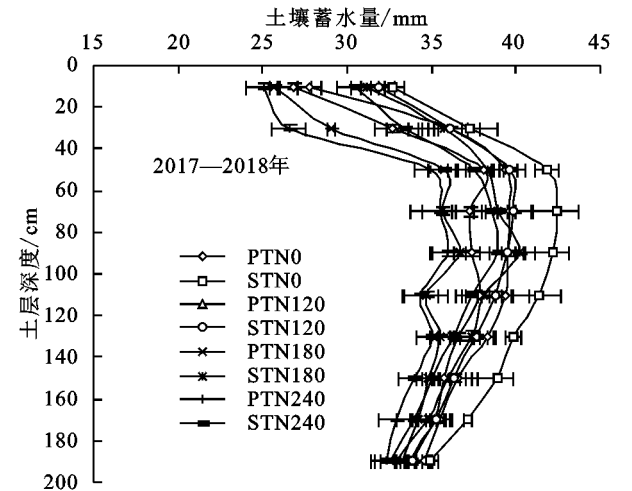
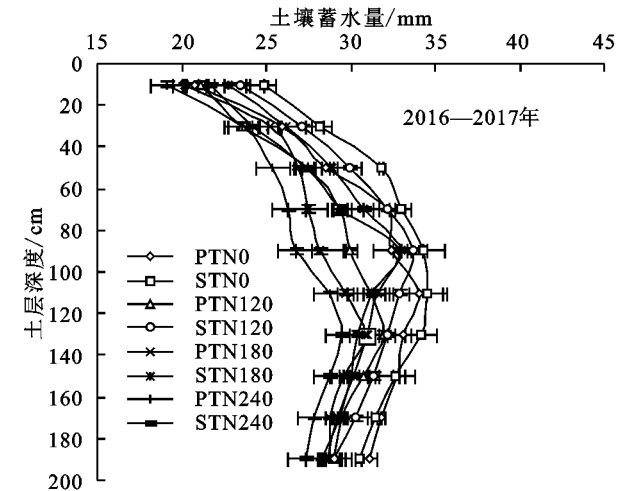


图 3 不同处理下旱地小麦开花期土壤蓄水量

2.3 耕作方式和氮肥用量对小麦产量和收获指数的影响

由表 2 可知,相同氮肥用量下,深松有利于提高

丰水年的穗数和穗粒数、欠水年的千粒重,但对收获指数并无显著影响($P>0.05$)。与翻耕相比,深松产量欠水年在 N0、N120、N180 和 N240 条件下分别提

高 11.5%，11.8%，7.1%，17.8%；丰水年 N0 处理下无显著差异，而 N120、N180 和 N240 条件下分别提高 15.9%，10.2%，22.0%。随着氮肥用量的增加总体呈穗数上升、收获指数下降，穗粒数和千粒重先升高后降低的趋势，但籽粒产量的变化因耕作方式而异，翻耕条件下 N180 的产量最高，2 年平均较 N0、N120、N240 分别提高 34.6%，10.6%，7.7%；深松条

件下 N240 的产量最高，2 年均值较 N0、N120、N180 分别提高 45.0%，8.2%，2.6%。可见，翻耕配施氮肥 180 kg/hm²可获得最高产量，而深松需配施氮肥 240 kg/hm²才能获得最高产量，主要是因为深松耕作和增加氮肥用量都可以有效协调穗数、穗粒数和千粒重，且深松还能减缓因过量施氮造成的产量负效应，提高产量。

表 2 不同处理下旱地小麦产量及其构成因素

年度	耕作	氮肥 用量	穗数/ (10 ⁴ hm ⁻²)	穗粒数/粒	千粒重/ g	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	收获 指数/%
2016—2017 年 (欠水年)	PT	N0	348f	26.8b	39.0bcd	3938d	48.2a
	PT	N120	380e	28.3a	37.9d	4412c	47.3ab
	PT	N180	413bc	27.5ab	39.1bc	4814b	46.9b
	PT	N240	437a	24.1c	38.5cd	4394c	42.8d
	ST	N0	388de	26.8b	39.0bcd	4389c	48.1ab
	ST	N120	398cd	28.5a	40.1ab	4931b	47.1ab
	ST	N180	419b	27.7ab	41.0a	5155a	47.0ab
	ST	N240	442a	27.2ab	39.6bc	5177a	45.3c
2017—2018 年 (丰水年)	PT	N0	376e	29.5c	37.9e	5291g	50.9a
	PT	N120	453c	30.5c	43.2a	6821f	48.2bc
	PT	N180	484b	33.9b	40.7c	7612d	47.4bc
	PT	N240	481b	33.1bc	39.5d	7145e	44.4d
	ST	N0	396d	29.6c	38.8de	5192g	44.3d
	ST	N120	463c	36.5a	41.0c	7906c	48.6b
	ST	N180	496ab	35.7a	41.5bc	8387 b	47.9bc
	ST	N240	503a	35.8a	42.3ab	8715 a	47.2c
变异来源(<i>F</i> 值)	年度		119.0**	243601.5**	7.3	28351.7**	8.7
	耕作		9.5*	27.2**	7.1*	266.0**	0.1
	氮肥用量		157.5**	11.1**	13.6**	909.8**	20.7**
	耕作×氮肥用量		2.1	11.4**	3.4*	59.8**	16.2**

注：同年度同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)；* 表示在 $P<0.05$ 水平显著差异；** 表示在 $P<0.01$ 水平显著差异。下同。

2.4 耕作方式和氮肥用量对旱地麦田水分恢复和小麦水分利用效率的影响

由表 3 可知，耕作方式和氮肥用量对休闲效率、成熟期土壤蓄水量以及生育期土壤耗水量具有显著的调节作用($P<0.05$)，但其互作效应不显著($P>0.05$)。与翻耕相比，欠水年和丰水年深松的休闲效率分别提高 44.7%和 11.4%，播前 0—200 cm 土层蓄水量提高 11.7%和 9.3%，虽然相同氮肥用量下生育期土壤水消耗量，特别是开花前的土壤水消耗量显著增加($P<0.05$)，但成熟期土壤蓄水量显著提高($P<0.05$)，从而影响水分利用效率，欠水年 N120 和 N240 下分别提高 4.6%和 11.2%，丰水年 N120、N180 和 N240 下提高 7.6%，3.0%，13.0%。随着氮肥用量的增加，花前土壤水消耗量显著增加($P<0.05$)，花后土壤水消耗量先降低($P<0.05$)后趋于稳定($P>0.05$)，致使成熟期土壤蓄水量逐渐降低，但休闲效率逐渐增加，播前土壤蓄水量在翻耕下能够得到恢复，在深松下还能显著增加。2 年总的水分利用效率翻耕下以 N180 最高，分别较 N0、N120 和 N240 提高

28.6%，8.6%，10.7%，深松下 N180 和 N240 间无显著差异($P>0.05$)，二者均显著高于 N0($P<0.05$)，且丰水年较 N120 分别提高 3.5%和 4.5%。从互作效应看，STN240 提高了休闲效率、播前底墒，较好的水分条件利于小麦产量形成，从而在生育期耗水量显著高于其他处理的情况下实现水分利用效率高于除欠水年 N180 外的其他处理($P<0.05$)。

2.5 耕作方式和氮肥用量对旱地小麦种植效益的影响

由表 4 可知，耕作和氮肥用量及其互作对旱地小麦总产出、经济效益和成本收益率均有显著的调节作用($P<0.05$)。从氮肥用量处理均值看，前后 2 年深松总产出较翻耕分别提高 11.9%和 12.4%，经济效益提高 15.2%和 20.3%，成本收益率提高 2.5%和 15.2%。随着施氮量的增加，成本增加，经济效益的变化因降水年型和耕作方式而异，翻耕下的总产出、经济效益和成本收益率以及深松下欠水年的成本收益先升后降，均以 N180 处理最高；深松下欠水年的总产出、经济效益以及丰水年的成本收益率先增后

稳,N240 与 N180 间无显著差异($P>0.05$),但除成本收益率外均显著高于 N120($P<0.05$);丰水年的总产出和经济效益显著提高($P<0.05$),但施氮处理间的成本收益率无显著差异($P>0.05$)。从互作效

应看,翻耕下及欠水年深松下配施氮肥 180 kg/hm²有利于提高经济效益和成本收益率,而丰水年深松配施氮肥 240 kg/hm²可显著提高总产出和经济效益($P<0.05$),并维持成本收益率不降低。

表 3 不同处理下旱地麦田水分恢复和小麦水分利用效率

年度	耕作	氮肥 用量	休闲 效率/%	播前土壤 蓄水量/mm	开花前土壤 耗水量/mm	开花后土壤 耗水量/mm	成熟期土壤 蓄水量/mm	生育期土壤水 消耗量/mm	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
2016—2017 年 (欠水年)	PT	N0	40.3b	371.2b	68.5f	30.8a	278.7c	99.3f	11.9e
	PT	N120	40.3b	371.2b	87.2e	20.7c	269.9d	107.9e	13.0cd
	PT	N180	40.3b	371.2b	95.5d	13.4d	268.8d	108.9e	14.2a
	PT	N240	40.3b	371.2b	107.9c	12.4d	259.8e	120.2d	12.5d
	ST	N0	58.3a	414.6a	99d	25.9b	298.6a	124.9cd	12.3de
	ST	N120	58.3a	414.6a	112.4c	18.9c	292.1b	131.3bc	13.6b
	ST	N180	58.3a	414.6a	121.2b	13.0d	289.0b	134.2b	14.1ab
	ST	N240	58.3a	414.6a	128.3a	14.3d	280.4c	142.6a	13.9ab
2017—2018 年 (丰水年)	PT	N0	47.2d	504.0d	137.3f	38.0b	328.7d	175.3g	14.7d
	PT	N120	48.7d	503.0d	151.9e	31.9cd	319.2e	183.8f	18.5c
	PT	N180	48.6d	501.6d	166.2d	27.9e	307.4f	194.1e	20.0b
	PT	N240	51.8c	505.6d	178.8c	23.6f	303.2f	202.4d	18.4c
	ST	N0	51.7c	543.9c	155.2e	44.3a	344.3a	199.5e	13.5e
	ST	N120	53.6b	547.2bc	178.2c	34.3c	334.5b	212.6c	19.9b
	ST	N180	55.1b	551.4ab	187.8b	33.0c	330.6bc	220.8b	20.6a
	ST	N240	58.3a	559.0a	204.9a	29.3de	324.9d	234.2a	20.8a
变异来源(<i>F</i> 值)	年		9.0 **	1238.9 **	212.0 **	74.7 *	1117.2 **	244.0 **	522.3 **
	耕作		584.7 **	1018.9 **	217.4 **	9.6 *	517.9 **	243.1 **	17.8 *
	氮肥用量		17.6 *	1.9	144.9 **	82.5 **	67.9 **	54.9 **	314.5 **
	耕作×氮肥用量		0.9	1.5	0.1	0.8	0	0.1	22.5 *

表 4 不同处理对旱地小麦种植效益

年度	耕作	氮肥 用量	氮肥投入/ (元·hm ⁻²)	总投入/ (元·hm ⁻²)	总产出/ (元·hm ⁻²)	经济效益/ (元·hm ⁻²)	成本收益率/ (元·元 ⁻¹)
2016—2017 年 (欠水年)	PT	N0	0	4482	8663d	4181c	1.93c
	PT	N120	480	4962	9707c	4745b	1.96bc
	PT	N180	720	5202	10592b	5390a	2.04a
	PT	N240	960	5442	9666c	4224c	1.78d
	ST	N0	0	4932	9657c	4725b	1.96bc
	ST	N120	480	5412	10849b	5437b	2.00ab
	ST	N180	720	5652	11341a	5689a	2.01ab
	ST	N240	960	5892	11390a	5498a	1.93c
2017—2018 年 (丰水年)	PT	N0	0	4482	11639g	7157f	2.60e
	PT	N120	480	4962	15007f	10045e	3.02c
	PT	N180	720	5202	16746d	11544d	3.22b
	PT	N240	960	5442	15719e	10277e	2.89d
	ST	N0	0	4332	11422g	7090f	2.64e
	ST	N120	480	4812	17393c	12581c	3.61a
	ST	N180	720	5052	18451b	13399b	3.65a
	ST	N240	960	5292	19172a	13880a	3.62a
变异来源(<i>F</i> 值)	年				28351.7 **	33727 **	26363.9 **
	耕作				266.0 **	131 **	13.8 *
	氮肥用量				909.8 **	588 **	262.9 **
	耕作×氮肥用量				59.8 **	61.8 **	50.5 **

3 讨论

3.1 耕作方式对旱地麦田土壤水分、产量和水分利用效率的影响

研究表明,与翻耕相比,深松后 20—40 cm 土层的容重显著降低($P<0.05$),有效提高了休闲效率,不仅使播前底墒显著增加($P<0.05$),而且使开花期和成熟期 0—200 cm 土层土壤蓄水分分别提高 5.0%~8.5%和 4.7%~8.2%,改善了小麦生育期的水分供应,从而使欠水年的增产 7.1%~17.8%,丰水年施氮处理的产量和水分利用效率分别提高 10.2%~22.0%和 3.0%~13.0%,这与前人^[3-8]发现的深松具有改土增蓄增产增效作用的研究结果一致,也是因为将深松时间从习惯的 7 月初提前到 6 月中旬(麦收后 2 周)并隔年进行,更好地发挥了提前深松促蓄^[14]、免耕保墒减耗^[15]的作用。

3.2 氮肥用量对旱地土壤水分、小麦产量和水分利用效率的影响

氮肥用量是调节麦田土壤水分、提高小麦产量和水分利用效率的有效途径。研究表明,相同耕作方式下,随施氮量的增加,旱地麦田土壤水消耗量逐渐增加,特别是花前土壤水消耗量显著增加,导致小麦开花期和成熟期 0—200 cm 土层土壤蓄水量逐渐降低,这主要是因为增加氮肥用量能促进根系对水分吸收,增加作物耗水,孙敏等^[5]在晋南旱地也得到了类似的结果。土壤水分被作物消耗后能否恢复关系着旱地可持续生产。在本试验条件下,由于增加氮肥用量提高小麦生物量,使麦收后用于覆盖的秸秆量大,有利于减少蒸发促进土壤蓄水保墒^[18],从而提高降水休闲效率,使翻耕下播前底墒能恢复到不施氮处理水平,深松下反而显著提高($P<0.05$)。然而,在本试验条件下,氮肥用量对产量和水分利用效率影响因耕作方式和降雨年型而异,随着氮肥用量的增加,翻耕下的小麦产量和水分利用效率先增加后降低,这与前人^[19-21]的研究结果一致;深松下欠水年产量和水分利用效率以及丰水年的水分利用效率先增加后稳定,而丰水年的产量持续增加,在一定程度上说明,深松改土增蓄有利于增产,所需的氮肥用量也应增加。熊淑萍等^[11]的研究也表明,深松较翻耕和旋耕应增加施氮量才能获得最高产。

3.3 耕作方式和氮肥用量互作对旱地土壤水分、小麦产量和水分利用效率的影响

研究表明,耕作方式和氮肥用量互作对土壤水分无显著影响,但显著影响旱地小麦穗粒数和千粒重,最终影响产量和水分利用效率,但不同耕作方式

的适宜施氮量并不相同,翻耕 2 年中均以配施氮肥 180 kg/hm²效果最佳,而与深松的适宜氮肥用量因降水年型而异,欠水年配施氮肥 180 kg/hm²,丰水年配施氮肥 240 kg/hm²效果最佳,深松较翻耕需要适度提高施氮量,且提高幅度因降水年型而异,丰水年高于欠水年。前人^[11]也得到了深松适宜施氮量高于翻耕,干旱时应减少施氮量^[20],丰水年配施高氮、平水年和覆盖下的欠水年配施中氮^[13]的结果。此外,STN0 处理连续 2 年不施氮肥,在丰水年的产量和水分利用效率较低,且较 PTN0 增幅不显著,充分说明,旱地土壤氮素供应不足会限制深松改土增蓄作用的发挥,这在一定程度上说明,深松条件下第 2 年的适宜施氮量增加是因为第 1 季小麦收获后土壤中氮素(硝态氮)残留量低于翻耕的缘故。

3.4 耕作方式和氮肥用量对旱地小麦种植效益的影响

经济效益、成本收益率等种植效益的高低直接影响生产者的种粮积极性,不断提高种植效益是小麦产业发展中必须解决的问题^[1]。研究表明,采用隔年深松技术,不仅提高了经济产量,产出增加 7.1%~22.0%,还可以减少作业次数,解决深松作业投入高的问题,从而节约成本,使经济效益提高 5.5%~35.1%,且丰水年施氮处理的成本收益率提高 13.4%~25.3%。在陕西合阳的研究^[15]也发现,深松在一定程度上增加了生产投入成本,但同一年同一作物不同轮耕体系间经济效益以深松最高,且其效应与降水年型有关,深松欠水年增收 14.4%,丰水年型增收 17.6%,与本研究结果相似。本研究亦发现,在隔年深松技术的基础上,通过氮肥用量优化可以进一步提高产出,从而提高经济效益并使成本收益率不降低,总体以 STN240 处理效果最优,这与合理施氮可在降低肥料成本的投入的同时提高小麦产量,从而提高小麦种植效益的研究^[22]结论一致。

综上,在秸秆全量覆盖还田条件下,麦收后 2 周左右隔年深松,不仅能提高休闲效率和播前底墒,而且能在开花期和成熟期保持较高的土壤水分,提高产量和水分利用效率,以及经济效益和成本收益率,实现增产增效增收同步,值得在旱地小麦生产中推广。但是,与深松配套的氮肥用量及其对小麦产量形成和水分利用的调控效应不同年份的表现存在差异,仍需确认其长期效应,以及拓展性研究以明确其在不同生态区域、土壤肥力、肥料种类等条件下的效应,以进一步完善旱地小麦深松增产增效增收理论与技术。

4 结论

(1)与翻耕相比,深松可使休闲效率提高 11.4%~

44.7%,显著改善小麦生育期的土壤水分特征,协同小麦穗数、穗粒数和千粒重,从而提高产量、效率、效益,尤其是丰水年效果更优。

(2)增加氮肥用量会增加旱地小麦对土壤水分特别是花前土壤水分的消耗,降低成熟期土壤蓄水量,但可提高休闲效率,使下季小麦播前的底墒得到恢复。

(3)麦收后 2 周左右隔年深松欠水年配施氮肥 180 kg/hm²、丰水年配施氮肥 240 kg/hm²可实现旱地小麦产量、水分利用效率和种植效益的同步提升。

参考文献:

[1] 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.

[2] 赵刚,樊廷录,李尚中,等.夏休闲期复种油菜对旱地土壤水分和小麦产量的影响[J].应用生态学报,2013,24(10):2807-2813.

[3] He J N, Shi Y, Yu Z W. Subsoiling improves soil physical and microbial properties, and increases yield of winter wheat in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J].Soil and Tillage Research,2019,187:182-193.

[4] Guaman V, Bath B, Hagman J, et al. Short time effects of biological and inter-row subsoiling on yield of potatoes grown on a loamy sand, and on soil penetration resistance, root growth and nitrogen uptake[J].European Journal of Agronomy,2016,80:55-65.

[5] 孙敏,温斐斐,高志强,等.不同降水年型旱地小麦休闲期耕作的蓄水增产效应[J].作物学报,2014,40(8):1459-1469.

[6] Mu X Y, Zhao Y L, Liu K, et al. Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat-maize cropping system on the North China Plain[J].European Journal of Agronomy,2016,78:32-43.

[7] 魏欢欢,王仕稳,杨文稼,等.免耕及深松耕对黄土高原地区春玉米和小麦产量及水分利用效率影响的整合分析[J].中国农业科学,2017,50(3):461-473.

[8] 王红光,于振文,张永丽,等.耕作方式对旱地小麦耗水特性和干物质积累的影响[J].作物学报,2012,38(4):675-682.

[9] 赵力莹,董文旭,胡春胜,等.耕作方式转变对小麦季农田温室气体排放和产量的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(11):1613-1623.

[10] 丁晋利,魏红义,杨永辉,等.保护性耕作对农田土壤水分和小麦产量的影响[J].应用生态学报,2018,29(8):2501-2508.

[11] 熊淑萍,王静,王小纯,等.耕作方式及氮用量对砂姜黑土区小麦氮代谢及籽粒产量和蛋白质含量的影响[J].植物生态学报,2014,38(7):767-775.

[12] 杨永辉,武继承,潘晓莹,等.不同耕作保墒措施下氮用量对小麦耗水量、产量及水分生产效率的影响[J].河南农业科学,2016,45(4):61-65.

[13] 梁艳妃,孙敏,高志强,等.夏休闲期深松耕作和氮肥用量对旱地小麦土壤水分及氮素利用的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2018,38(9):16-23.

[14] 赵红梅,高志强,赵维峰,等.休闲期耕作对旱地小麦籽粒蛋白质形成及其相关酶活性的影响.麦类作物学报,2013,33(2):331-338.

[15] 于琦,李军,周栋,等.不同降水年型黄土旱塬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.

[16] 张北赢,徐学选,刘文兆,等.土丘陵沟壑区不同降水年型下土壤水分动态[J].应用生态学报,2008,19(6):1234-1240.

[17] 李荣,侯贤清,吴鹏年,等.秸秆还田配施氮肥对土壤性状与水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2019,50(8):289-298.

[18] Zhang P, Wei T, Wang H X, et al. Effects of straw mulch on soil water and winter wheat production in dryland farming[J].Scientific Reports,2015,5:e10725

[19] 雒文鹤,师祖姣,王旭敏,等.节水减氮对土壤硝态氮分布和小麦水氮利用效率的影响[J].作物学报,2020,46(6):924-936.

[20] 李正鹏,宋明丹,冯浩.不同降水年型水氮运筹对小麦耗水和产量的影响[J].农业工程学报,2018,34(18):160-167.

[21] 段文学,于振文,张永丽,等.施氮量对旱地小麦耗水特性和产量的影响[J].作物学报,2012,38(9):1657-1664.

[22] 丛鑫,张立志,徐征和,等.水氮互作对冬小麦水肥利用效率与经济效益的影响[J].农业机械学报,2021,52(3):315-324.