

秸秆还田替代化肥对黄土旱塬小麦产量及水肥利用的影响

王嘉豪¹, 李廷亮^{1,2,3}, 黄璐¹, 宋红梅¹

(1.山西农业大学资源环境学院,山西 太谷 030801;2.山西农业大学农业资源与环境国家级实验教学示范中心,山西 太谷 030801;3.黄土高原特色作物优质高效生产省部共建协同创新中心,山西 太谷 030801)

摘要:为研究不同秸秆还田量替代部分化肥后对黄土高原冬小麦产量、水肥利用效率和硝态氮积累特征的影响。于2018—2021年在晋南黄土旱塬冬小麦种植区,设置秸秆不还田(S0)、秸秆半量还田(S1/2)、秸秆全量还田(S1)、秸秆2倍量还田(S2)4个还田量处理,研究不同秸秆还田量替代化肥对冬小麦产量形成、水肥利用效率及土壤硝态氮残留的影响。结果表明:在黄土旱塬麦区,秸秆还田替代8.3%~31.9% N和15.7%~63.2% P₂O₅的基础上,冬小麦产量总体随秸秆还田量增加而增加,且在降水丰沛年份,增加秸秆还田量可产生更大的产量效应。3年试验总体表明,S2处理冬小麦平均产量分别较S0、S1/2和S1处理分别高17.5%($P<0.05$),10.4%($P<0.05$),4.3%。连续3年秸秆还田均提高了冬小麦穗数,S2处理冬小麦平均单位面积穗数分别较S0、S1/2和S1处理高17.1%($P<0.05$),12.3%($P<0.05$),3.6%,不同处理间穗粒数和千粒重差异不显著。播前2 m土壤贮水量总体随着还田量的增加而增加,试验期间S2处理平均贮水量较S0提高8.3%($P<0.05$)。冬小麦生育期耗水量也表现为随着还田量的增加而增加,S2处理平均耗水量较S0处理增加了10.0%($P<0.05$)。不同处理间水分生产效率差异不显著,平均为14.9 kg/(hm²·mm)。在秸秆还田替代部分化肥基础上,旱塬冬小麦肥料利用效率随着秸秆还田量的增加而增加,其中,S2处理平均氮肥偏生产力(PFP_N)、氮肥农学效率(AE_N)、氮肥当季回收率(RE_N)和磷肥偏生产力(PFP_P)较S0处理分别提高66.4%,155.8%,113.5%,105.2%。连续3年秸秆不还田使0—2 m土壤硝态氮残留量较2018年播前提高100.6%,并随水向下淋溶在深层土壤中累积,而秸秆还田处理2 m土层硝态氮累积量均低于2018年播前,S2处理2 m土壤硝态氮残留量最低,为244.8 kg/hm²。综合考虑,晋南黄土旱塬麦区,在秸秆还田替代8.3%~31.9% N和15.7%~63.2% P₂O₅基础上,可增加播前土壤底墒,降低肥料残留,并提高肥料利用效率,进而提高冬小麦产量,其中,以2倍秸秆还田量(平均为7 477 kg/hm²)产生的产量和水肥效应最佳。研究结果可为推进旱作麦区面源污染防控和冬小麦高产高效绿色生产提供理论依据。

关键词: 秸秆还田; 旱塬冬小麦; 产量; 水肥利用; 硝态氮残留

中图分类号:S158.3;S512.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)03-0236-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.03.034

Effects of Straw Returning Instead of Fertilizer on Wheat Yield and Water and Fertilizer Utilization in Loess Dryland

WANG Jiahao¹, LI Tingliang^{1,2,3}, HUANG Lu¹, SONG Hongmei¹

(1.Collage of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801; 2.National Demonstration Center for Agricultural Resources and Environment Experimental Teaching, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801; 3.Ministerial and Provincial Co-Innovation Centre for Endemic Crops Production with High-quality and Efficiency in Loess Plateau, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: In order to determine the effects of different straw returning amounts instead of some chemical fertilizers on yield, water and fertilizer use efficiency and nitrate accumulation characteristics of winter wheat, from 2018 to 2021, an experiment including four treatments, which were no straw returning (S0), half of straw returning (S1/2), total straw returning (S1) and two times straw returning (S2), was conducted in the Winter wheat planting region in loess dryland of southern Shanxi to study the effects of different straw returning amounts instead of some chemical fertilizers on yield formation of winter wheat, water and fertilizer use efficiency and soil nitrate-N residue. The results showed that on the basis of straw instead of 8.3%~

收稿日期:2021-10-12

资助项目:黄土高原特色作物优质高效生产省部共建协同创新中心基金项目(SBGJXTZX-25)

第一作者:王嘉豪(1996—),男,硕士研究生,主要从事土壤—作物养分循环与调控研究。E-mail:18335464884@163.com

通信作者:李廷亮(1982—),男,博士,教授,主要从事土壤—作物养分循环与调控研究。E-mail:lingliang021@126.com

31.9% N and 15.7%~63.2% P_2O_5 in winter wheat growing region of loess dryland, the yield of winter wheat generally increased with the increasing of straw returning amount, and in wet year, increasing the amount of straw returning could produce greater yield effect. The 3-year experiment showed that the average yield of winter wheat in the treatment of S2 was 17.5% ($P<0.05$), 10.4% ($P<0.05$) and 4.3% higher than that in S0, S1/2 and S1 treatment, respectively. The spike number per hectare of winter wheat was increased by returning straw to the field for three consecutive years. The average spike number of winter wheat in S2 treatment was higher 17.1% ($P<0.05$), 12.3% ($P<0.05$) and 3.6% higher than that in S0, S1/2 and S1 treatment, respectively, but there was no significant difference in Kernels number per spik and thousand kernel weight among different treatments. The 0—2 m soil water storage before seeding gradually increased with the increasing of straw returning amount to the field, and during the experiment, the average soil storage of S2 was 8.3% higher than that of S0 treatment ($P<0.05$). Water consumption also increased with the increasing of straw returning amount, and the average water consumption of S2 was 10.0% ($P<0.05$) higher than that of S0 treatment. There was no significant difference in water production efficiency among different treatments, with an average of 14.9 kg/($hm^2 \cdot mm$). Based on straw returning instead of partial fertilizer, the fertilizer use efficiency of winter wheat in loess dryland increased with the increasing of straw increasing amount, and the average nitrogen partial fertilizer productivity of N (PEP_N), agronomic efficiencies of N (AE_N), current recovery efficiencies of N (RE_N) and partial fertilizer productivity of P (PEP_P) of S2 treatment were 66.4%, 155.8%, 113.5% and 105.2% higher than those of S0 treatment, respectively. After three consecutive years of no straw returning, the soil nitrate-N residue of 2 m soil layer increased by 100.6% compared with that pre-sowing in 2018, and nitrate nitrogen accumulated in deep soil layer with downward leaching of water. The accumulation of nitrate nitrogen in 2 m soil layer of straw returning treatment was lower than that pre-sowing in 2018, and the residue of nitrate nitrogen in 2 m soil treated with S2 was the lowest, 244.8 kg/ hm^2 . Comprehensively considered, in the wheat planting region of loess Dryland in southern Shanxi, straw instead of 8.3%~31.9% N and 15.7%~63.2% P_2O_5 could increase soil moisture before sowing, reduce fertilizer residue, improve fertilizer use efficiency and obtain remarkable yield. Among the different treatments, the yield and water and fertilizer effect in the S2 treatment (average straw returning amount 7 477 kg/ hm^2) were the best. The results could provide theoretical basis for the prevention and control of non-point source pollution and the high-yield and high-efficiency green production of winter wheat in the dryland of wheat area.

Keywords: straw returning; winter wheat of dryland; yield; water and fertilizer use; nitrate residue

黄土高原是我国典型旱作区,土壤有机质含量低,水分不足,化肥过量施用不仅制约了肥料利用效率的提升,还造成土壤养分大量残留,其中,土壤氮素残留尤为严重。小麦是当地重要粮食作物,种植面积占总耕地面积的44%^[1],其秸秆富含氮、磷和钾等养分元素,还田可培肥土壤并释放矿质养分,是一种重要的有机肥源。据统计,我国西北地区小麦秸秆年均产量为1 826万t,秸秆全量还田相当于施入农田土壤中的N、 P_2O_5 、 K_2O 量分别为 11.7×10^4 、 4.9×10^4 、 27.9×10^4 t^[2]。明确黄土旱塬麦区秸秆还田替代部分化肥后,冬小麦产量形成以及水肥利用效率的变化特征,对推进黄土高原旱作农业提质增效绿色生产有重要意义。

近年来,我国作物肥料用量远超世界平均水平,达到346.5 kg/ hm^2 ,而肥料利用率仅有30%左右^[3]。在黄土旱塬麦区,氮肥投入量远超过当前产量的氮

素需求量,60%以上农户存在过量施氮现象^[4]。肥料过度施用使其大量残留于土壤中,在黄土高原南部旱地冬小麦/夏玉米轮作系统中发现,冬小麦收获期2 m土壤氮素残留量甚至高达当季施氮量的83.7%^[5]。过量施肥还会造成土壤板结,地下水体污染,造成极大的环境代价。作物秸秆是农业生产中最经济有效的养分资源,具有较大的替代化肥潜力。宋大利等^[6]对2015年我国主要作物秸秆资源估算发现,我国小麦秸秆年资源量14 320万t,N、 P_2O_5 、 K_2O 储量分别为 88.4×10^4 、 23.3×10^4 、 175.4×10^4 t。充分利用秸秆资源,对减少化肥投入,维持土壤养分平衡有重要意义。秸秆还田后可以降低土壤容重,提高土壤孔隙度,增加水分入渗能力并减少蒸发,极大程度提升土壤蓄水保墒能力^[7-8]。王庆杰等^[9]研究表明,秸秆覆盖还田使冬小麦生育期内平均土壤含水率提高

15.4%~16.5%，覆盖量越大，土壤含水率越高。不仅如此，秸秆还田还使作物生产性耗水能力增强，提高水分利用效率。秸秆还田还可以提升植株养分吸收量和籽粒转移量，提升养分利用效率，减少肥料损失^[10]。同时，秸秆还田后有利于小麦个体生长发育和群体构建，增加小麦干物质积累量^[11]，改善产量构成三要素^[8]，使小麦增产。

秸秆还田量对改善土壤水分状况、养分吸收利用和作物产量形成有重要的影响，但在不同生态区域内不同秸秆还田量的调控效果存在差异，针对性地探究适宜本地区的秸秆还田量，进而实现作物提质增效绿色生产尤为重要。以往多单纯考虑不同秸秆方式和还田量下作物的产量特征和水肥效应，而有关秸秆还田替代部分化肥条件下，土壤水分和养分的变化特征及产量形成的研究相对较少。本试验在黄土高原东南部的晋南旱塬冬麦种植区，研究不同秸秆还田量替

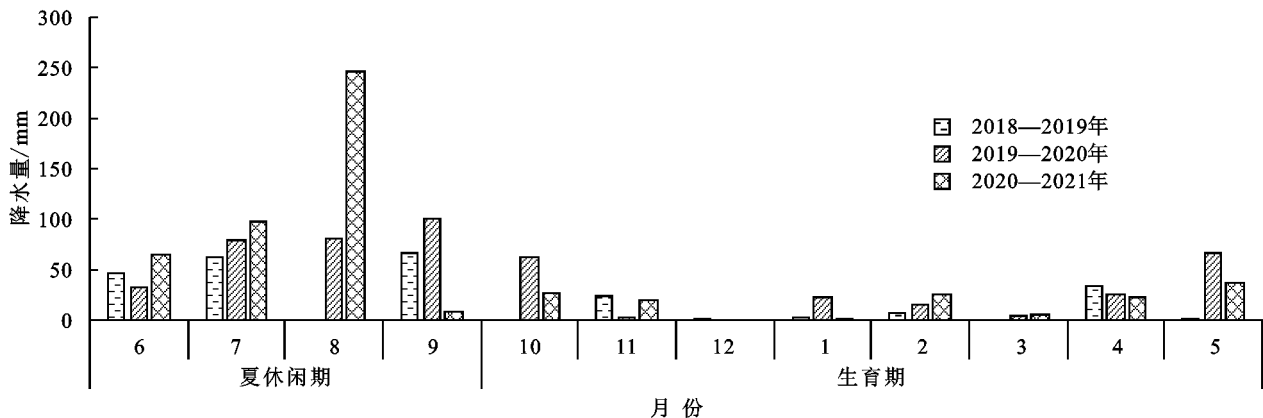


图 1 试验期降水量分布

1.2 试验设计

试验以秸秆资源化利用替代部分化肥为目标，设置 4 个处理：(1) 秸秆不还田(S0)，小麦收获后，将小麦秸秆移走，2~3 周后翻地；(2) 秸秆半量还田(S1/2)，移走 1/2 的小麦秸秆；(3) 秸秆全量还田(S1)；(4) 秸秆 2 倍量还田(S2)，从其他地方移来。每个处理重复 4 次，采用随机区组设计，小区面积 30 m×4.2 m=126 m²。试验期间秸秆还田量基于上一年 S1 处理秸秆产量计算，因产量年际差异，年度间秸秆还田量也有一定差异。秸秆还田方式为粉碎翻压还田。

3 年度冬小麦播种时间为 2018 年 10 月 14 日、2019 年 10 月 20 日和 2020 年 10 月 12 日，收获时间为 2019 年 6 月 9 日、2020 年 6 月 3 日和 2021 年 6 月 5 日，6 月中旬到 9 月下旬为夏休闲期。冬小麦播种方式为垄膜沟播，施肥整地后，起垄覆膜，沟内膜侧播种，播种 2 行，行距 20 cm，垄宽 35 cm，垄高 10 cm，沟宽 30 cm。供试小麦品种为“晋麦 47”，播量为 150 kg/hm²，试验期间无任何灌溉。

各处理所用氮肥为尿素(N 含量为 46%)，磷肥

代化肥对冬小麦产量形成，水肥利用效率及土壤硝态氮残留特征的影响，探明该地区的适宜的秸秆还田量及化肥替代当量，以期为我国农业面源污染防控，土壤质量提升和农业绿色生产提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2018—2021 年进行，试验地位于黄土高原东南部的山西省洪洞县刘家垣镇东梁村(36°22'N, 111°35'E, 海拔 648 m)，是典型的小麦一年一作区。该地区属于温带大陆季风性气候，年均气温 12.6℃，积温 3 300℃左右，无霜期 180~210 天，年均降水量 500 mm，约 60%~70%集中于 6—9 月，降水分布不均匀。供试土壤为石灰性褐土，质地为中壤。试验开始前耕层土壤有机碳和全氮含量分别为 9.85, 0.85 g/kg，硝态氮、速效磷、速效钾含量分别为 22.0, 23.4, 289.6 mg/kg，pH 为 8.1。试验期降水情况见图 1。

为过磷酸钙(P₂O₅ 含量为 16%)，各处理施肥量根据“1 m 硝态氮监控，磷钾恒量施肥”原则^[12]，在秸秆还田前采集土壤样品测定 1 m 土层硝态氮含量，0—40 cm 土层速效磷、速效钾含量，根据所得养分含量并结合目标产量确定施肥量，根据秸秆养分含量及养分释放量计算得到最终施肥量，另设不施肥处理做空白对照。

2018—2019 年还田秸秆中 N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 0.61%、0.56%、1.45%；2019—2020 年分别为 0.57%、0.41%、1.52%；2020—2021 年分别为 0.64%、0.27%、1.53%。秸秆腐解的氮、磷和钾的释放率按 50%、65%、90%计算^[13-15]。各处理具体施肥量以及秸秆还田量见表 1。所有肥料均作为底肥一次性施入。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 样品采集 在冬小麦播前和收获采集 0—2 m 土壤，每 20 cm 为 1 层，用于测定土壤含水量和硝态氮含量。在冬小麦收获期于各小区中央收获 15 m×2 m=30 m² 的小麦，脱粒后测产，并在各小区有代表性的选取 3 个 1 m 的小麦样段，用于测定穗数、穗粒数、千粒重。

表1 不同处理施肥量及秸秆还田替代化肥比例

年份	处理	施肥量/(kg·hm ⁻²)			秸秆还田量/ (kg·hm ⁻²)	化肥替代比例/%	
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O		N	P ₂ O ₅
2018—2019	S0	82	76	0	0	0	0
	S1/2	72	64	0	3250	12.2	15.8
	S1	62	52	0	6500	24.4	31.6
	S2	42	28	0	13000	48.8	63.2
2019—2020	S0	91	35	0	0	0	0
	S1/2	87	31	0	1400	4.4	11.4
	S1	83	28	0	2800	8.8	20.0
	S2	75	20	0	5600	17.6	42.9
2020—2021	S0	113	0	0	0	0	0
	S1/2	104	0	0	2826	8.0	0
	S1	95	0	0	5653	15.9	0
	S2	77	0	0	11306	31.9	0
平均值	S0	72	76	0	0	0	0
	S1/2	66	64	0	1869	8.3	15.8
	S1	60	52	0	3738	16.7	31.6
	S2	49	28	0	7477	31.9	63.2

1.3.2 测定项目及方法 土壤含水量用烘干法测定,土壤硝态氮含量以氯化钾浸提,紫外分光光度法^[16]测定,土壤速效磷含量用碳酸氢钠浸提,钼蓝比色法^[17]测定;土壤速效钾含量用乙酸铵浸提,火焰光度法^[17]测定。

1.3.3 计算方法 (1)土壤贮水量、耗水量及水分利用效率的计算公式为:

$$W = h \times \rho \times \omega \times 10 \quad (1)$$

式中:W为土壤贮水量(mm);h为土层深度(cm),每20cm为1层; ρ 为土壤容重(g/cm³),0—20,20—40,40—60,60—80,80—200cm的土壤容重分别为1.25,1.35,1.35,1.30,1.36g/cm³; ω 为土壤质量含水量(%)。

$$ET = (W_1 - W_2) + P \quad (2)$$

式中:ET为土壤耗水量(mm);P为冬小麦生育期降水量(mm);W₁、W₂分别为播前和收货后的土壤贮水量(mm)。由于本试验中仅有降水作为水分来源,无地表径流且试验地地下水为较深故用此式。

$$WUE = Y/ET \quad (3)$$

式中:WUE为水分生产效率(kg/(hm²·mm));Y为冬小麦籽粒产量(kg/hm²)。

(2)养分利用效率的计算公式为:

氮(磷)肥偏生产力(kg/kg)=施氮(磷)处理冬小麦籽粒产量(kg/hm²)/施氮(磷)量(kg/hm²)

氮肥农学效率(kg/kg)=(施氮处理冬小麦籽粒产量(kg/hm²)-不施氮处理冬小麦籽粒产量(kg/hm²))/施氮量(kg/hm²)

氮肥当季回收率(%)=(施氮处理冬小麦收获后地

上部氮累积量(kg/hm²)-不施氮处理冬小麦收获后地上部氮累积量(kg/hm²))/施氮量(kg/hm²)×100%

1.4 数据处理

用Microsoft Excel 2010软件整理数据并做图表,用SPSS 22.0软件进行检验统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田量替代化肥对旱地冬小麦产量及产量构成的影响

由表2可知,试验期间在秸秆替代8.3%~31.9%N和15.8%~63.2%P₂O₅基础上,秸秆还田处理冬小麦籽粒产量较不还田处理平均增加14.7%。2018—2019年,秸秆还田替代化肥处理下籽粒产量无显著差异,仅S1处理较S0处理提高35.1%(P<0.05);2019—2020年,秸秆还田替代化肥处理间差异亦不显著,平均为4315kg/hm²,S1、S2处理较S0处理提升显著;2020—2021年,籽粒产量的变化规律与2019—2020年类似,秸秆还田替代化肥处理的籽粒产量提高6.3%~25.8%(P<0.05),S2处理显著高于其他处理,为5160kg/hm²(P<0.05)。不同处理下冬小麦生物产量变化规律类同于籽粒产量。旱塬冬小麦籽粒产量和生物产量受降水量影响,表现出极显著的年际差异,且年份与秸秆还田替代化肥处理的交互作用也对冬小麦籽粒产量和生物产量有极显著影响。随着降水量的增加,增加秸秆还田量可产生更大的产量效应。总体而言,在增加秸秆还田量使化肥逐渐减量的条件下,S2处理的产量效应最佳,

较 S0、S1/2 和 S1 处理高 17.5% ($P < 0.05$), 10.4% ($P < 0.05$), 4.3%。3 年内不同处理间冬小麦收获指数没有显著变化, 平均为 39.4%。

从产量构成来看, 年份和不同处理以及两者交互作用对冬小麦穗数具有极显著的影响。不同处理对

穗粒重和千粒重均无显著影响, 但年度间穗粒重和千粒重均有显著差异。总体上, S2 处理冬小麦穗数分别较 S0、S1/2 和 S1 处理高 17.1% ($P < 0.05$), 12.3% ($P < 0.05$), 3.6%。不同处理冬小麦穗粒数和千粒重平均值分别为 23.0 粒和 31.0 g。

表 2 不同秸秆还田量替代化肥对冬小麦产量及产量构成的影响

年份	处理	籽粒产量/ (kg · hm ⁻²)	生物产量/ (kg · hm ⁻²)	收获 指数/%	穗数/ (10 ⁴ · hm ⁻²)	穗粒数/粒	千粒重/g
2018—2019	S0	1092b	3372c	32.4b	254.4b	17.2b	30.0ab
	S1/2	1238ab	3753b	33.0ab	243.4b	20.5a	29.8ab
	S1	1475a	4264a	34.6a	306.8a	18.3ab	31.6a
	S2	1287ab	3699b	34.8a	293.1a	18.6ab	28.4b
2019—2020	S0	4095b	9435b	43.4a	489.7b	21.4a	32.4a
	S1/2	4292ab	9854ab	43.6a	517.1ab	22.9a	34.9a
	S1	4404a	10057a	43.8a	532.6a	23.6a	32.0a
	S2	4470a	10361a	43.2a	534.9a	22.0a	32.8a
2020—2021	S0	4101c	9868b	41.7a	492.8c	28.9a	28.9a
	S1/2	4359b	10134b	43.2a	529.1bc	27.5a	30.2a
	S1	4588b	11841a	38.9a	559.0b	27.4a	30.0a
	S2	5160a	12801a	40.3a	620.9a	27.5a	30.2a
平均值	S0	3096c	7558c	39.2a	412.3b	22.5a	30.4a
	S1/2	3296bc	7914bc	39.9a	429.9b	23.6a	31.6a
	S1	3489ab	8721ab	39.1a	466.1a	23.1a	31.2a
	S2	3639a	8954a	39.4a	483.0a	22.7a	30.5a
P 值							
年份		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
处理		<0.001	<0.001	0.778	<0.001	0.608	0.069
年份 × 处理		<0.001	<0.001	0.276	<0.001	0.538	0.010

注: 同列不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

2.2 不同秸秆还田量替代化肥对旱地冬小麦水分效应的的影响

由表 3 可知, 前 2 年不同处理间播前 2 m 土壤贮水量变幅不大, 而 2020—2021 年, 休闲期降水大幅增长, 秸秆还田替代化肥处理对播前底墒提升显著, S2 处理的播前 2 m 土壤贮水量最高。从 3 年总体变化情况看, 播前 2 m 土壤贮水量随着还田量的增加而增加, S2 处理的播前 2 m 土壤贮水量较 S0 处理提高 8.3% ($P < 0.05$), 这为冬小麦高产提供了良好条件。收获后各处理 2 m 土壤贮水量差异不显著, 不同降水冬小麦播前 2 m 土壤贮水量呈随休闲期降水量增加而增加的趋势, 收获后 2 m 土壤贮水量受降水量影响不大。冬小麦生育期耗水量表现为随着还田量的增加而增加, 总体上秸秆还田替代化肥后冬小麦耗水量增加, 但不同还田量间差异不显著, 仅 S2 处理较 S0 处理显著提高 10.0%。耗水量变化规律与播前土壤贮水量类同。3 年内不同处理间水分生产效率差异不显著, 平均为 14.9 kg/(hm² · mm)。

2.3 不同秸秆还田量替代化肥对旱地冬小麦肥料利用效率的影响

由表 4 可知, 总体上秸秆还田替代化肥处理的旱地冬小麦氮肥偏生产力 (PFP_N)、氮肥农学效率 (AE_N)、氮肥当季回收率 (RE_N) 和磷肥偏生产力 (PFP_P) 较不还田处理分别提高 37.8%, 90.4%, 62.0%, 55.6%。各年度不同处理间肥料利用效率均表现为随着还田量的增加而增加, S2 处理下 PFP_N、AE_N、RE_N 和 PFP_P 均为最高。从 3 年变化情况看, 半量秸秆还田 (S1/2 处理) 替代化肥后 (替代比例为 N 8.3%, P₂O₅ 15.8%) 肥料利用效率提升不显著, 提高秸秆还田量 (S1、S2 处理) 替代更多化肥后 (替代比例为 N 16.7%~31.9%, P₂O₅ 31.6%~63.2%), 肥料利用率显著提升。其中, S2 处理下平均 PFP_N、AE_N、RE_N 和 PFP_P 显著高于其他处理, 与 S0 处理相比提高幅度分别达到 66.4%, 155.8%, 113.5%, 105.2%。旱地冬小麦肥料利用效率表现出随年度降水量增加而增加的趋势。

表 3 不同秸秆还田量替代化肥对冬小麦水分利用的影响

年份	处理	播前 2 m 土层	收获后 2 m 土层	休闲期	生育期	耗水量/mm	水分生产效率/ (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)
		贮水量/mm	贮水量/mm	降水量/mm	降水量/mm		
2018—2019	S0	204.6a	202.9a	175.2	68.9	70.6b	15.5b
	S1/2	200.8a	190.1b	175.2	68.9	79.6ab	15.6b
	S1	205.2a	190.3b	175.2	68.9	83.8a	17.6a
	S2	205.0a	190.7b	175.2	68.9	83.2a	15.5b
2019—2020	S0	297.6ab	176.3ab	293.8	198.8	320.1a	12.8b
	S1/2	283.2b	166.6b	293.8	198.8	315.4a	13.6a
	S1	309.6a	191.2a	293.8	198.8	317.2a	13.9a
	S2	299.4ab	178.1ab	293.8	198.8	320.1a	14.0a
2020—2021	S0	302.1c	171.0b	416.8	138.6	269.7b	15.2ab
	S1/2	344.2b	172.5b	416.8	138.6	310.3a	14.0b
	S1	347.0b	174.5ab	416.8	138.6	311.1a	14.7ab
	S2	366.7a	182.3a	416.8	138.6	323.1a	16.0a
平均值	S0	268.1b	183.4a	295.3	135.4	220.1b	14.5a
	S1/2	276.1ab	176.4a	295.3	135.4	235.1ab	14.4a
	S1	287.3ab	185.3a	295.3	135.4	237.4ab	15.4a
	S2	290.4a	183.7a	295.3	135.4	242.1a	15.2a

表 4 不同秸秆还田量替代化肥对冬小麦肥料利用效率的影响

年份	处理	氮肥偏生产力(PFP _N)/	氮肥农学效率(AE _N)/	氮肥当季	磷肥偏生产力(PFP _P)/
		(kg · kg ⁻¹)	(kg · kg ⁻¹)	回收率(RE _N)/%	(kg · kg ⁻¹)
2018—2019	S0	13.3d	4.8b	13.4b	14.4c
	S1/2	17.2c	5.0ab	14.3b	19.3bc
	S1	23.8b	6.9a	19.6a	28.4b
	S2	30.6a	7.1a	20.4a	46.0a
2019—2020	S0	45.0c	6.4c	16.4c	117.0c
	S1/2	49.3b	9.0b	21.9b	138.5bc
	S1	53.1a	10.8ab	25.1a	157.3b
	S2	59.6a	12.8a	26.9a	223.5a
2020—2021	S0	36.3d	4.3c	32.5c	—
	S1/2	41.9c	7.2c	40.4bc	—
	S1	48.3b	10.3b	49.0b	—
	S2	67.0a	20.1a	85.9a	—
平均值	S0	31.5c	5.2c	20.8c	65.7c
	S1/2	36.1c	7.1bc	25.5bc	78.9bc
	S1	41.7b	9.3b	31.2b	92.9b
	S2	52.4a	13.3a	44.4a	134.8a

2.4 不同秸秆还田量替代化肥对晋南旱塬麦田硝态氮残留的影响

由图 2 可知,2018 年播前 2 m 硝态氮残留量为 307.4 kg/hm²,经过 3 季种植后,秸秆不还田(S0)处理 2 m 硝态氮残留量较 2018 年播前提高 100.6%,0—40 cm 土层硝态氮残留占到总残留量的 44.9%,随水向下淋移并集中于 140—200 cm 土层,占总残留量 25.5%。连续 3 年秸秆还田替代化肥处理与秸秆不还田处理相比,2 m 硝态氮残留量有明显差异,更多量秸秆还田以及化肥减量后土壤硝态氮残留量逐渐下降,且 2021 年收获后,S1 和 S2 处理 2 m 硝态氮残留量均低于 2018 年播前,表明通过秸秆还田替代化肥在减少肥料投入的同时实现了对土壤残留氮肥有效利用,降低了硝态氮随水下渗的风险。不同处理间以 S2 处理(平均替代 N

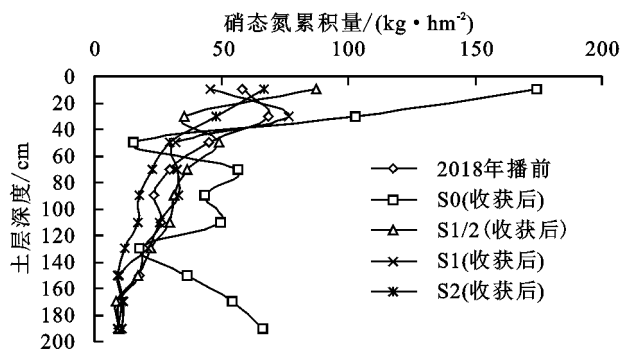
31.9%)2 m 土壤硝态氮残留量最低,为 244.8 kg/hm²,较 2018 年播前 2 m 土壤硝态氮量减少了 20.4% ($P < 0.05$)。秸秆还田替代化肥处理 2 m 土壤硝态氮残留量分布规律与 2018 年播前一致。

3 讨论

3.1 秸秆还田替代化肥对旱塬冬小麦产量形成特征的影响

黄土旱塬冬麦区,秸秆还田替代部分化肥能提高冬小麦产量。本研究中,秸秆还田在替代 8.3%~31.9% N,15.8%~63.2% P₂O₅ 基础上,冬小麦平均增产 14.7%。作物产量主要受土壤水分、温度以及养分变化影响,秸秆还田不仅能增强土壤蓄水保墒能力,调节土壤温度,还能显著提高土壤养分供应水平和能力,从而产生更大的增产效应^[18]。作物秸秆存在巨

大的替代化肥潜力,在秸秆还田基础上减施化肥存在可行性。有研究^[18-19]表明,化肥减量 15%~30% 配合秸秆还田能提升土壤肥力水平,促进作物生长发育,实现作物增产,与本研究结果基本一致。因此,秸秆还田可作为一种化肥减量有机替代手段。另外,前人^[20-21]研究表明,黄土高原西部实行前茬作物秸秆半量至全量还田能在提高土壤水分及养分的基础上,充分发挥其生产潜力并使作物增产。本研究中,在晋南旱塬麦区以 2 倍秸秆还田(平均为 7 477 kg/hm²),产量效应最佳。这可能与当地土壤氮素储量有关,秸秆分解转化过程氮素消耗并不影响作物养分吸收,且 2 倍秸秆还田量能为冬小麦生长营造更好的土壤环境,从而使冬小麦产量提高显著。不仅如此,更高的化肥替代比例降低生产成本,达到经济与生态效益相统一。此外,本研究中年际差异也对冬小麦产量存在极显著影响,降水量少时冬小麦生长受到抑制,作物产量整体较低,此时秸秆全量还田替代化肥处理的籽粒产量最高,这可能是 2 倍量秸秆还田后腐解过程中水分消耗加大,在土壤水分不足时产生与作物竞争水的现象,影响小麦生长发育。降水增多保证了土壤水分供应,增加还田量产生更大增产效应,表现出随着还田量的增加而增加的趋势。



注:S0、S1/2、S1、S2 数据为 2021 年小麦收获后土壤中硝态氮含量。

图 2 不同秸秆还田量替代化肥下麦田不同土层土壤硝态氮累积

有研究^[22]表明,秸秆还田后穗数变化是影响小麦产量的直接原因。本研究中秸秆还田替代化肥处理在不同程度上提高了冬小麦穗数,总体表现为 2 倍秸秆还田量替代化肥处理提升最多。秸秆 2 倍量还田处理营造了更好的水热条件,使其群体数量更大,穗数的提升效果最佳。本研究还发现,秸秆还田对冬小麦穗粒数和千粒重影响不显著,可能是短期秸秆还田并未影响冬小麦单穗结实率及灌浆过程。

3.2 秸秆还田替代化肥对晋南旱塬冬小麦水分利用的影响

水分是旱地农业生产的主要限制因子^[23],而秸秆还田能抑蒸保墒,提高作物水分利用效率^[7-8]。秸秆还田量影响着保墒效果,已有研究^[9]表明,在华北

麦玉种植区,秸秆还田量与播前土壤水分含量呈线性关系,水分含量随着还田量的增加而增加。本研究中,播前 2 m 土壤贮水量总体随着秸秆还田量的增加而增加,S2 处理提升最多,与上述研究结果一致。良好的播前底墒促进了冬小麦盘根分蘖,有利于培育壮苗,同时,也为冬小麦后期生长提供良好的水分基础,促进冬小麦增产^[8,24]。本研究中随着夏休闲期降水量越多,秸秆还田的蓄水保墒能力得以发挥,不同秸秆还田量蓄水保墒差异越明显。当然,秸秆还田量并不是越多越好,适量秸秆还田能改善土壤结构,提高播前保墒贮水能力,过量还田则可能引起腐解过程耗水过多,加剧田间蒸发,影响土壤含水量,需因地制宜确定秸秆还田量。收获后 2 m 贮水量差异不显著,这可能是秸秆还田对土壤水分的时空再分配,平衡了各生育阶段的水分需求所导致^[8]。

土壤水分的增加使冬小麦生长耗水增加,冬小麦耗水量随年度降水量增加呈增加趋势,秸秆还田替代化肥处理冬小麦生育期耗水增加了 6.8%~10.0%,耗水量增加促进小麦干物质积累量增加,有利于实现高产,与前人^[7]研究结果一致。另外,本研究中不同秸秆还田量处理的水分生产效率差异不显著,平均为 14.9 kg/(hm²·mm),表明秸秆还田增产的耗水量主要用于了冬小麦产量的形成。其他研究^[24]发现,秸秆还田受腐解程度和该地区的秸秆还田量阈值的影响,未能提高水分利用效率。而本研究中,不同降水年型下冬小麦的水分生产效率差异亦不明显,可能是由于降水量的提高,水分无效比例也在增加,这限制了水分利用效率的提升。

3.3 秸秆还田替代化肥对晋南旱塬冬小麦肥料利用效率的影响

化肥过量施用导致大量养分在土壤中残留,限制了肥料利用效率的提升^[4]。作物秸秆有巨大的化肥替代潜力,在减肥基础上以秸秆替代,有利于肥料利用效率的提升。曾研华等^[25]研究表明,南方稻区实行秸秆全量还田可替代氮磷钾肥 29.5%,4.0%,50.0%基础上,提升植株对氮磷钾养分的吸收运移,降低土壤中无机养分的残留,提高肥料利用效率。本研究中,秸秆还田替代化肥处理与不还田处理相比,冬小麦氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥当季回收率、磷肥偏生产力分别提高 37.8%,90.4%,62.0%,55.6%,不仅减少化肥投入,还实现了养分高效利用。原因是秸秆还田后自身腐解释放的营养元素补充了被替代的部分化肥,平衡养分供应。此外,秸秆经分解后为微生物提供丰富的碳源,增加了土壤微生物数量和活性,提升养分有效性,土壤养分供应潜力和供应能力增强,养分无效损失比例也大大降低,

更多的养分被作物吸收利用,进而使肥料利用效率提升^[10,26]。还田量过大会引起 C/N 失衡,微生物固定氮素不仅使作物吸收量减少,还造成氮肥气态损失,影响肥料利用效率,而本研究中,提高秸秆还田量替代更多化肥后(替代比例为 N 16.7%~31.9%, P₂O₅ 31.6%~63.2%),肥料利用率也随之提升。原因是试验地土壤氮素含量高,高量秸秆还田并未影响作物对氮素的吸收利用,以及高量秸秆还田后产生更大的产量效应,使肥料利用效率提升显著。本研究中旱塬冬小麦肥料利用效率随降水量增加而增加的趋势,表明土壤水分对不同还田量替代化肥的肥料利用效率的影响不可忽视。

3.4 秸秆还田替代化肥对晋南旱塬麦田硝态氮残留的影响

硝态氮是植物吸收利用的土壤氮的主要形态之一,上季作物收获后残留的硝态氮能被下季作物吸收利用,但残留过量则可能导致在降水量或灌溉量大时,使硝态氮向深层淋洗,造成地下水污染。本研究中连续 3 年秸秆不还田,0—2 m 硝态氮累积量较 2018 年播前增加 100.6%,由于较高的降水强度(试验期内累计降水量为 1 292.1 mm),有向下淋溶趋势,表现为在 140—200 cm 土层累积,占总残留量的 25.5%。本研究还表明,不同秸秆还田量替代化肥处理均可以减少黄土旱塬麦田土壤 2 m 硝态氮残留量,其中,2 倍还田量处理(平均替代 N 31.9%)较 2018 年播前降低了 20.4%($P < 0.05$)。已有研究^[26-27]表明,化肥减量降低了土壤中氮素残留程度,而秸秆还田提高作物地上部吸氮量,更多土壤氮素被作物携出,同时也提升微生物活性和数量,使易损失的无机氮转化为相对稳定的有机氮,从而使无机氮含量下降。Dai 等^[28]研究发现,黄土高原每 1 mm 降水可使硝态氮向下淋溶 3.6 mm,本研究中秸秆还田替代化肥后硝态氮主要在表层聚集,较少的氮肥投入,以及秸秆还田提升作物吸氮量和土壤固氮量,有效降低了硝态氮随水向下淋溶的风险。此外,本研究仅实行了 3 年秸秆还田,而有研究^[29]表明,长期秸秆还田不仅能固持硝态氮,还能降低深层土壤中氮矿化速率和硝化潜势,降低氮素淋失风险。因此,持续推进秸秆还田替代部分化肥,对防治农业面源污染,保证粮食安全,促进农业可持续发展有重要意义。

4 结论

黄土旱塬冬麦区,秸秆还田可增加冬小麦播前底墒,在替代 8.3%~31.9% N 和 15.7%~63.2% P₂O₅ 基础上,显著提高肥料利用效率并降低土壤硝态氮残留量,进而提高冬小麦产量。秸秆还田处理的产量及水肥效应受降水年型影响表现出较大的年际差异性,

降水量增加可提升秸秆还田处理的产量及水肥利用效率。总体来看,在晋南黄土旱塬麦区,以 2 倍秸秆还田量(平均为 7 477 kg/hm²)产生的增量和水肥效应最佳。水肥利用效率提升同时可降低肥料过量施用引起的环境风险,进而可推进旱作冬小麦高产高效绿色生产。

参考文献:

- [1] Gao Y J, Li Y, Zhang J C, et al. Effects of mulch, N fertilizer, and plant density on wheat yield, wheat nitrogen uptake, and residual soil nitrate in a dryland area of China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 85 (2): 109-121.
- [2] 李廷亮,王宇峰,王嘉豪,等.我国主要粮食作物秸秆还田养分资源量及其对小麦化肥减施的启示[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(23): 4835-4854.
- [3] 唐汉,王金武,徐常塑,等.化肥减施增效关键技术研究进展分析[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(4): 1-19.
- [4] 赵护兵,王朝辉,高亚军,等.陕西省农户小麦施肥调研评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 245-253.
- [5] 王西娜,王朝辉,李华,等.旱地土壤中残留肥料氮的动向及作物有效性[J]. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1202-1212.
- [6] 宋大利,侯胜鹏,王秀斌,等.中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 1-21.
- [7] Chen Y L, Liu T, Tian X H, et al. Effects of plastic film combined with straw mulch on grain yield and water use efficiency of winter wheat in Loess Plateau [J]. *Field Crops Research*, 2015, 172: 53-58.
- [8] 陈玉章,柴守玺,程宏波,等.秸秆还田结合秋覆膜对旱地冬小麦耗水特性和产量的影响[J]. *作物学报*, 2019, 45 (2): 256-266.
- [9] 王庆杰,王宪良,李洪文,等.华北一年两熟区玉米秸秆覆盖对冬小麦生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48 (8): 192-198.
- [10] 张刚,王德建,俞元春,等.秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(4): 877-885.
- [11] 王健波,严昌荣,刘恩科,等.长期免耕覆盖对旱地冬小麦旗叶光合特性及干物质积累与转运的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 296-305.
- [12] 曹寒冰,王朝辉,师渊超,等.渭北旱地冬小麦监控施氮技术的优化[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(19): 3826-3838.
- [13] 刘晓永,李书田.中国秸秆养分资源及还田的时空分布特征[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 1-19.
- [14] 龚振平,邓乃榛,宋秋来,等.基于长期定位试验的松嫩平原还田玉米秸秆腐解特征研究[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(8): 139-145.
- [15] 刘单卿,李顺义,郭夏丽.不同还田方式下小麦秸秆的腐解特征及养分释放规律[J]. *河南农业科学*, 2018, 47 (4): 49-53.

- 配施量对水稻 Cd 迁移累积的影响[J].2020,39(11):2554-2560.
- [17] Wya B, Cla B, Swa B, et al. Influence of biochar and biochar-based fertilizer on yield, quality of tea and microbial community in an acid tea orchard soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 166; e104005.
- [18] 罗煜, 赵立欣, 孟海波, 等. 不同温度下热裂解芒草生物质炭的理化特征分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(13): 208-217.
- [19] Keiluweit M, Nico P S, Johnson M G, et al. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar) [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(4): 1247-1253.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [21] 李昂, 王旭, 范洪黎. 4 种土壤调理剂改良红壤铝毒害的效果研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(4): 7-11.
- [22] Chintala R, Schumacher T E, Mcdonald L M, et al. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures [J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2014, 42(5): 626-634.
- [23] Yuan J H, Xu R K, Wang N, et al. Amendment of acid soils with crop residues and biochars [J]. *Pedosphere*, 2011, 21(3): 302-308.
- [24] Li J Y, Wang N, Xu R K, et al. Potential of industrial byproducts in ameliorating acidity and aluminum toxicity of soils under tea plantation [J]. *Pedosphere*, 2010, 20(5): 645-654.
- [25] 吴道铭, 傅友强, 于智卫, 等. 我国南方红壤酸化和铝毒现状及防治[J]. *土壤*, 2013, 45(4): 577-584.
- [26] Uchimiya M, Wartelle L H, Klasson K T, et al. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(6): 2501-2510.
- (上接第 243 页)
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GBT32737-2016 土壤硝态氮的测定紫外分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 黄容, 高明, 万毅林, 等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻一菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(11): 4446-4456.
- [19] 朱浩宇, 高明, 龙翼, 等. 化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响[J]. *环境科学*, 2020, 41(4): 1921-1929.
- [20] Wang X J, Jia Z K, Liang L Y, et al. Changes in soil characteristics and maize yield under straw returning system in dryland farming [J]. *Field Crops Research*, 2018, 218: 11-17.
- [21] 侯慧芝, 张绪成, 尹嘉德, 等. 秸秆还田量对旱地全膜覆土穴播春小麦水分利用及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2021, 41(4): 457-464.
- [22] 黄婷苗, 郑险峰, 侯仰毅, 等. 秸秆还田对冬小麦产量和氮、磷、钾吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 853-863.
- [23] 余坤, 冯浩, 李正鹏, 等. 秸秆还田对农田土壤水分与冬小麦耗水特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(10): 116-123.
- [24] 林祥, 王东. 不同底墒条件下补灌对冬小麦耗水特性、产量和水分利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(9): 1357-1369.
- [25] 曾研华, 范呈根, 吴建富, 等. 等养分条件下稻草还田替代双季早稻氮钾肥比例的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3): 658-668.
- [26] 陈金, 唐玉海, 尹燕桦, 等. 秸秆还田条件下适量施氮对冬小麦氮素利用及产量的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(1): 160-167.
- [27] 马红梅, 曹寒冰, 谢英荷, 等. 晋南黄土旱塬小麦养分投入与化肥减施经济环境效应评价[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(13): 2804-2817.
- [28] Dai J, Wang Z H, Li M H, et al. Winter wheat grain yield and summer nitrate leaching: Long-term effects of nitrogen and phosphorus rates on the Loess Plateau of China [J]. *Field Crops Research*, 2016, 196: 180-190.
- [29] 盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 等. 长期增施有机肥/秸秆还田对土壤氮素淋失风险的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(12): 2336-2347.