

减氮覆膜对黄土旱塬小麦产量构成及水肥利用效率的影响

刘凯¹, 刘冰², 谢英荷^{1,3}, 李廷亮^{1,3}, 张奇茹¹,
李顺¹, 窦露¹, 柳玉凤¹, 纪美娟¹, 姜丽伟¹

(1.山西农业大学资源环境学院,山西 太谷 030801; 2.太原市园林绿化工程质量监督站,太原 030002;
3.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)

摘要:为明确减氮测控定量施肥技术结合地膜覆盖措施对黄土旱塬冬小麦产量构成及水肥利用效率的影响,为旱地冬小麦减氮施肥及提高产量提供理论依据,于2013—2018年在晋南黄土旱塬冬小麦种植区,设置农户施肥种植模式、减氮测控施肥、减氮测控施肥+垄膜沟播和减氮测控施肥+平膜穴播4种处理,分析了在减氮覆膜条件下连续5年冬小麦产量构成情况、土壤水分和氮、磷、钾肥利用效率。结果表明:(1)减氮测控施肥较农户模式在减少氮肥施用量46.9%,平衡施用磷钾肥的情况下,冬小麦年均籽粒产量、生物产量和公顷穗数分别增加4.4%,4.0%和4.3%,氮肥收获指数和偏生产力分别提高4.3%和120.3%,同时促进了冬小麦地上部分对磷素和钾素的吸收量;(2)在减氮测控施肥基础上进行覆膜种植,地膜覆盖使水分利用效率和生育期耗水量分别增加13.8%~23.9%和7.1%~10.1%,氮肥收获指数提高1.7%~3.5%,偏生产力提高21.7%~41.4%,生理效率降低8.7%~16.8%,磷肥和钾肥的偏生产力分别提高22.4%~39.2%和19.3%~37.1%。地膜覆盖良好的水肥调节作用使垄膜沟播和平膜穴播的籽粒产量、生物产量、公顷穗数和千粒重较不覆膜分别增加21.0%,39.2%,18.2%,4.7%和23.5%,40.3%,27.6%,7.0%。因此,为了实现小麦增产和肥料增效,减氮测控定量施肥技术与地膜覆盖措施相结合的种植方式可以在黄土旱塬冬小麦种植区进行推广应用。

关键词: 减氮覆膜; 黄土旱塬; 冬小麦; 产量构成; 水肥利用效率

中图分类号:S158;S512.1⁺1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)03-0198-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.030

Effects of Nitrogen Reduction and Film Mulching on Wheat Yield Composition and Utilization Efficiency of Water and Fertilizer in the Loess Plateau

LIU Kai¹, LIU Bing², XIE Yinghe^{1,3}, LI Tingliang^{1,3}, ZHANG Qiru¹,

LI Shun¹, DOU Lu¹, LIU Yufeng¹, JI Meijuan¹, JIANG Liwei¹

(1.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801; 2.Quality Supervision Station of Garden Greening Project in Taiyuan, Taiyuan 030002; 3.National Experimental Teaching Demonstration Center of Agricultural Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: To determine the effects of nitrogen reduction combined with film mulching measures on the yield composition and the utilization efficiency of water and fertilizer of winter wheat in the Loess Plateau, and to provide theoretical basis for reducing the application of nitrogen fertilizer and increasing the yield of winter wheat in dry land, in 2013—2018, experiment was conducted in winter wheat growing region of dry highland in Southern Shanxi. In the experiment, four treatment were set up, which were farmer pattern, monitoring fertilization, monitoring fertilization plus ridge mulching-furrow planting and monitoring fertilization plus whole field filming with soil covering and hole-seeding. The yield components, soil moisture and the utilization efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer were analyzed under the condition of reducing nitrogen and mulching for five consecutive years. The results showed that: (1) Compared with farmer pattern, total nitrogen application in the monitoring fertilization treatments decreased by 46.9%, and under

收稿日期:2019-10-31

资助项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0200401);国家公益性行业(农业)科研专项(201303104,201503124);山西省重点研发计划项目(201803D221005-2)

第一作者:刘凯(1991—),男,在读硕士研究生,主要从事农业资源与环境研究。E-mail:294408490@qq.com

通信作者:谢英荷(1958—),女,教授,主要从事农业资源与环境研究。E-mail:xiyinghe@163.com

the condition of balanced application of phosphorus and potassium fertilizer, the average annual grain yield, biological yield and panicle number per hectare of winter wheat increased by 4.4%, 4.0% and 4.3%, respectively, the nitrogen harvest index and the partial productivity of nitrogen fertilizer increased by 4.3% and 120.3%, respectively. At the same time, the uptake of phosphorus and potassium by above ground part of winter wheat was promoted. (2) On the basis of monitoring fertilization, plastic film mulching planting increased water use efficiency and water consumption in growth period by 13.8%~23.9% and 7.1%~10.1%, respectively. At the same time, the harvest index of nitrogen fertilizer increased by 1.7%~3.5%, the partial productivity increased by 21.7%~41.4%, the physiological efficiency reduced by 8.7%~16.8%, and the partial productivity of phosphorus fertilizer and potassium fertilizer increased by 22.4%~39.2% and 19.3%~37.1%, respectively. Good water and fertilizer regulation effect of plastic film mulching planting increased the grain yield, the biological yield, the hectares ears and the 1000-grain weight by 21.0%, 39.2%, 18.2% and 4.7% in the treatment of ridge mulching-furrow planting, respectively, and by 23.5%, 40.3%, 27.6% and 7.0% in the treatment of whole field filming with soil covering and hole-seeding, respectively. Therefore, in order to increase wheat yield and fertilizer efficiency, the combination of the nitrogen reduction and control fertilization technology and the ground film covering measures can be applied in the planting area of the Loess Plateau.

Keywords: nitrogen reduction and film mulching; Loess Plateau; winter wheat; yield composition; utilization efficiency of water and fertilizer

小麦是我国黄土高原地区重要的粮食作物,对保障我国粮食安全具有重要意义,然而土壤贫瘠和水分不足严重制约着当地冬小麦的生产。化肥对农作物产量的贡献率为 35%~66%,然而却存在着严重的过量施肥现象。近年来,我国的化肥施用量增加了 34%,但粮食总产量却下降了 1.4%,化肥的利用效率大幅下降,我国农田施入的氮肥只有 34.3%能被作物吸收利用,其余以氨挥发、表观硝化-反硝化、淋溶和径流等形式发生损失^[1]。李廷亮等^[2]研究表明,黄土旱塬冬小麦种植区由于长期过量施用氮肥已导致土壤硝态氮在 1 m 土层的积累,积累量在 100 kg/hm² 以上。大量的肥料损失会对土壤、水体和大气造成污染,影响该系统内作物的正常生长,不利于我国农业的可持续发展和生态环境的保护。因此,必须制定合理的施肥量,减少肥料损失。董强等^[3]在黄土高原地区连续 3 年试验中研究发现,在传统施肥基础上减施氮肥 20%,作物产量没有减少,氮肥农学效率及偏生产力分别增加了 20.2%~23.2%和 21.9%~23.7%;张嫚等^[4]研究发现,减氮处理可促进作物对硝态氮的吸收,籽粒产量和氮素积累量较传统施肥提高 15.4%和 27.3%,显著提高了氮素吸收率和生产效率。黄土高原地区降水少且不稳定,严重影响产量的稳定性,地膜覆盖技术具有保温保墒、增加对深层水分利用、活化土壤养分和促进作物对养分吸收利用等作用,是提高粮食产量的重要手段之一^[5]。地膜覆盖具有良好的保墒增产效果,较不覆膜可增加苗期含水量 64%~91%,降低生育期蒸发量 16%~19%,提高水分利用效

率 37.8%~41.5%,增加生物产量 22.5%~25.3%^[6]。任江波等^[7]研究发现,地膜覆盖可提高土壤肥力,显著增加土壤氮、磷、钾含量,同时具有良好的保肥效果,可降低径流中硝态氮、全磷和钾离子的浓度。在玉米生育期覆膜,增加了玉米对氮素的吸收利用,增加叶子和茎秆中的氮素含量,从而减少土壤剖面硝态氮的含量和积累量^[8]。

综上所述研究大多集中在减氮措施对作物生长和产量以及地膜覆盖对水分和养分的研究,而对于多年减氮测控施肥以及在此基础上进行不同覆膜种植后对冬小麦产量构成和水肥利用效率的研究报道尚少。因此本试验在晋南黄土旱塬冬麦区,研究了连续 5 年减氮测控定量施肥及不同覆膜种植下,对冬小麦产量构成、水分利用效率和氮、磷、钾肥料的利用效率,以为黄土旱塬冬小麦减氮增效的持续安全生产提供一定的理论依据和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地位于山西洪洞县刘家垣镇东梁村(36°22' N, 111°35' E)海拔 648 m,为长期定位试验区。试验区属于温带季风气候,年均温 12.6 °C,年平均日照时间 2 419 h,≥10 °C 活动积温 3 327 °C,无霜期 180~210 天,年均降水量约 500 mm,约 70%集中在 6—9 月(表 1)。供试土壤为石灰性褐土,土壤质地为中壤土,2013 年播前耕层土壤 pH 为 7.66,有机质量为 15.02 g/kg,全氮量为 0.77 g/kg,硝态氮量为 8.19 mg/kg,速效磷量为 11.28 mg/kg,速效钾量为 208.15 mg/kg。

1.2 试验设计

试验始于 2013 年,于 2018 年结束,设置农户施

肥种植模式、减氮测控施肥、减氮测控施肥+垄膜沟播和减氮测控施肥+平膜穴播 4 种处理(表 2)。

表 1 冬小麦试验期间降水分布情况

单位:mm

年份	夏闲期					生育期								
	6月	7月	8月	9月	总量	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	总量
2013—2014	27.9	312.8	66.6	57.4	464.7	36.4	4.3	0	0	12.0	18.1	52.1	63.7	186.6
2014—2015	75.7	61.8	126.9	148.9	413.3	10.9	6.2	0	4.2	3.3	0.5	38.6	32.2	95.9
2015—2016	22.2	51.1	15.5	51.5	140.3	49.9	49.0	0.8	4.2	1.8	2.3	21.6	54.2	183.8
2016—2017	61.8	248.3	31.0	16.5	357.6	50.1	10.8	6.2	1.2	4.8	4.1	37.7	31.8	146.7
2017—2018	87.4	148.3	66.8	17.3	319.8	73.2	1.3	3.4	5.2	0	21.2	67.1	29.8	201.2

处理 1 为农户施肥种植模式(农户模式),常规平作,不覆膜,行距 20 cm,施肥量为当地农民习惯的施肥量,具体为 N:150 kg/hm²,P₂O₅:60 kg/hm²。

处理 2 为减氮测控施肥处理(测控施肥),耕作方式同农户模式,施肥采用“0—100 cm 土壤硝态氮监控施肥,0—40 cm 土层磷钾恒量施肥”技术,其中施氮量(以纯 N 计)=作物目标产量需氮量-播前 0—100 cm 土壤硝态氮累积量+播前 0—100 cm 土壤硝态氮安全阈值(110.0 kg/hm²);施磷(钾)量=作物目标产量需磷(钾)量×施磷(钾)系数;施磷(钾)系数依

据 0—40 cm 土层速效磷钾量确定^[9]。

处理 3 为减氮测控施肥+垄膜沟播处理(垄膜沟播),在减氮测控施肥的基础上,垄上覆膜,沟内播种,垄宽 35 cm,沟宽 30 cm。

处理 4 为减氮测控施肥+平膜穴播处理(平膜穴播),在减氮测控施肥的基础上,全地面平铺地膜,膜上覆土 0.5~1 cm,播种行距 15~16 cm,穴距 12 cm。

每个处理 4 次重复,每块地设置一个重复,采用随机区组排列,由于地块大小原因,小区面积为 210~520 m²。具体施肥量见表 2。

表 2 试验地各处理 N—P₂O₅—K₂O 养分用量

单位:kg/hm²

处理	2013—2014	2014—2015	2015—2016	2016—2017	2017—2018
农户模式	150—60—0	150—60—0	150—60—0	150—60—0	150—60—0
测控施肥	142.5—63.8—37.9	51—83—53	58—53—45	90.75—74.85—31.8	56—111—29
垄膜沟播	142.5—63.8—37.9	51—83—53	58—53—45	90.75—74.85—31.8	56—111—29
平膜穴播	142.5—63.8—37.9	51—83—53	58—53—45	90.75—74.85—31.8	56—111—29

所有种植方式为播前浅旋耕,深度 13 cm。试验中施用的氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 11%),钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%),均作底肥均匀施入土壤,翻入耕层后耙平。冬小麦品种为“晋麦 47 号”,播量为 150 kg/hm²,播种时间为每年 10 月 1—10 日,收获时间为翌年 6 月 1—10 日,6—9 月为夏闲期,冬小麦在整个生育期不灌溉。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 样品采集 分别于 2013—2018 年冬小麦播种前和收获后,每层 20 cm,每小区进行多点采样,采集 0—200 cm 土壤样品用于测定土壤硝态氮,0—40 cm 土壤样品测定土壤速效磷和速效钾含量。

1.3.2 测定项目与方法

土壤硝态氮采用 CaCl₂ 浸提,流动分析仪^[10]测定。土壤有效磷采用 NaHCO₃ 浸提,钼蓝比色法^[10]测定。土壤速效钾采用 NH₄ OAc 浸提,火焰光度法^[10]测定。

1.3.3 计算方法

籽粒收获指数=籽粒产量/地上部分生物量×100%

土壤贮水量(mm)=土壤质量含水量(%)×土壤容重(g/cm³)×土层厚度(cm)/10(0—20,20—40,40—60,60—80 cm 土壤容重分别为 1.21,1.35,1.35,1.30,80—200 cm 土层为 1.36 g/cm³)

水分生产效率=籽粒产量(kg/hm²)/耗水量(mm)

耗水量(mm)=土壤贮水量变化量(mm)+生育期降水量(mm)

N(P,K)收获指数(%)=籽粒氮素积累量(kg/hm²)/地上部氮素积累量(kg/hm²)×100%

N(P,K)生理效率(kg/kg)=籽粒产量(kg/hm²)/地上部氮素积累量(kg/hm²)×100

N(P,K)肥表观回收率=[施 N(P,K)肥后作物收获时地上部的吸 N(P,K)总量-未施 N(P,K)肥作物收获期地上部分的吸 N(P,K)总量]/化学纯 N(P,K)的投入量

N(P,K)偏生产力(kg/kg)=施 N(P,K)肥后所获得的生物产量(kg/hm²)/化肥 N(P,K)的投入量(kg/hm²)

1.3.4 计算方法与数据处理 试验数据用 Microsoft Excel 2016 整理作图,并用 SPSS 19.0 软件进行统计分析,采用 LSD 法检验 $P < 0.05$ 水平上的差异性。

2 结果与分析

2.1 减氮覆膜对黄土旱塬冬小麦产量构成的影响

由表 3 可知,所有处理除 2015—2016 年外,其余年份的籽粒产量和生物产量均表现为平膜穴播 > 垄膜沟播 > 测控施肥 > 农户模式。在 5 年试验间,农户模式的籽粒产量为 2 235.7~4 350.2 kg/hm²,均值 3 612.2 kg/hm²,农户模式的生物产量为 6 245~10 242 kg/hm²,均值 8 485 kg/hm²。减氮测控施肥较农户模式在 5 年

总施氮量减少 46.9% 的情况下,年均籽粒产量和生物产量分别增加 4.4% 和 4.0%。可见,减少氮肥的施用量并不影响冬小麦的籽粒产量和生物产量。在减氮测控施肥基础上进行覆膜种植,垄膜沟播和平膜穴播的籽粒产量和生物产量较不覆膜分别增加 21.0%, 39.2% 和 23.5%, 40.3%, 平膜穴播的增加效果更显著,且差异达显著水平,主要因为地膜覆盖可减少土壤水分的无效损失,提高土壤含水量,同时能够活化土壤养分,促进作物对养分的吸收,从而提高冬小麦产量和生物量。 F 值检验表明,黄土旱塬冬小麦的籽粒产量和生物产量具有极显著的年际差异性,年份和地膜的交互作用对其也具有极显著影响。

表 3 2013—2018 年不同种植模式下冬小麦的产量与产量构成

年份	处理	籽粒产量/ (kg · hm ⁻²)	生物产量/ (kg · hm ⁻²)	产量构成要素			收获 指数/%
				穗数/ (×10 ⁴ · hm ⁻²)	穗粒数/粒	千粒重/ g	
2013—2014	农户模式	4226d	9204c	434d	21a	49b	46a
	测控施肥	4495c	10005c	469c	21a	48b	45a
	垄膜沟播	5246b	12566b	534b	20a	52a	42b
	平膜穴播	6277a	14232a	620a	21a	52a	44a
2014—2015	农户模式	4350c	9633c	525b	24a	41b	45a
	测控施肥	4614c	10222c	548b	24a	42b	45a
	垄膜沟播	5051b	11573b	641a	25a	42b	44a
	平膜穴播	5662a	12823a	671a	26a	44a	44a
2015—2016	农户模式	2923c	6245c	382b	27a	42b	46a
	测控施肥	2831c	5881c	382b	27a	42b	48a
	垄膜沟播	3825b	8360b	487a	21b	44a	46a
	平膜穴播	4426a	9435a	504a	22b	45a	47a
2016—2017	农户模式	4327c	10242b	431b	23a	41b	44a
	测控施肥	4511c	10304b	443b	23a	41b	44a
	垄膜沟播	5583b	12245a	550a	25a	43a	45a
	平膜穴播	6310a	13969a	600a	25a	43a	45a
2017—2018	农户模式	2236c	7099c	311c	23a	40b	32a
	测控施肥	2400c	7727c	335c	21ab	41b	31a
	垄膜沟播	3100b	9764b	359b	20b	42b	32a
	平膜穴播	3579a	11478a	382a	22ab	45a	31a
平均值	农户模式	3612c	8485d	417d	24a	43b	43a
	测控施肥	3770c	8828c	435c	23a	43b	43a
	垄膜沟播	4561b	10902b	514b	22a	45ab	42a
	平膜穴播	5251a	12387a	555a	23a	46a	42a
	年份 Y	118.7**	83.3**	35.7**	42.6**	221.3**	12.9*
F 值	处理 T	27.9**	16.9**	33.7**	0.8	5.2**	0.4
	年份×处理 Y×T	5.1**	7.4**	3.1**	8.3**	1.9*	0.9

注:表中同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著;* 表示不同处理间差异显著;** 表示不同处理间差异极显著。下同。

从产量构成来看,农户模式和减氮测控施肥在穗粒数和千粒重方面无显著差异,减氮测控施肥的公顷穗数较农户模式提高 4.3%,差异达到显著水平。减

氮测控施肥的平均穗数和千粒重分别为 435×10^4 穗/hm² 和 43 g,在其基础上进行覆膜种植,垄膜沟播和平膜穴播的平均公顷穗数和千粒重分别提高

18.2%, 4.7% 和 27.6%, 7.0%, 其中以平膜穴播的增加效果最为明显, 这可能与平膜穴播播种行距较小、良好的水肥调节效果有关, 冬小麦可充分利用水分、养分和光照资源。不同处理间黄土旱塬冬小麦的穗粒数和收获指数没有显著变化。

2.2 减氮覆膜对黄土旱塬冬小麦耗水量及水分生产效率的影响

由表 4 可知, 4 种处理在 5 年种植过程中播前土壤贮水量无显著差异。减氮测控施肥收获后土壤贮水量低于农户模式, 生育期耗水量和水分利用效率高于农户模式, 但差异性不显著, 这主要是由于减氮测控施肥的

冬小麦产量和生物量略高于农户模式, 导致耗水量增加。在减氮测控施肥基础上进行覆膜种植, 垄膜沟播和平膜穴播在收获后土壤贮水量较不覆膜分别降低 6.5% 和 9.8%, 生育期耗水量分别增加 7.1% 和 10.1%, 水分利用效率分别增加 13.8% 和 23.9%, 平膜穴播的耗水量和水分利用效率均大于垄膜沟播。这主要是由于地膜覆盖可减少土壤水分蒸发, 增加土壤温度, 从而起到活化土壤养分的作用, 良好的水肥调节促进了冬小麦的籽粒和生物产量的增加, 导致耗水量和水分利用效率的增加。F 值检验表明, 不同年限、不同处理以及年限和处理的交互作用对水分的生产效率均达到极显著水平。

表 4 2013—2018 年不同种植模式下冬小麦耗水量及水分生产效率

年份	处理	生育期 降水量/mm	播前土壤 贮水量/mm	收获后土壤 贮水量/mm	耗水量/ mm	水分生产效率/ (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)
2013—2014	农户模式	186.6	357.7a	214.6a	329.7b	12.9b
	测控施肥	186.6	379.5a	206.4a	359.6a	12.5b
	垄膜沟播	186.6	379.2a	212.6a	353.2a	14.9ab
	平膜穴播	186.6	376.8a	212.2a	351.2a	17.9a
2014—2015	农户模式	95.9	332.9b	206.8a	222.0b	19.6a
	测控施肥	95.9	340.1ab	205.2a	230.8b	20.3a
	垄膜沟播	95.9	359.5ab	180.7b	274.8a	19.0a
	平膜穴播	95.9	377.2a	174.3b	298.8a	19.0a
2015—2016	农户模式	183.8	269.0a	220.1a	232.7a	12.9c
	测控施肥	183.8	273.4a	231.7a	210.5b	13.6c
	垄膜沟播	183.8	258.4a	209.9b	233.2a	16.7b
	平膜穴播	183.8	293.3a	202.8b	240.4a	18.4a
2016—2017	农户模式	146.7	343.2a	183.2a	306.7b	14.1b
	测控施肥	146.7	344.9a	181.8a	309.8b	14.6b
	垄膜沟播	146.7	340.2a	165.0b	321.9a	18.5a
	平膜穴播	146.7	355.6a	157.8b	324.5a	19.5a
2017—2018	农户模式	196.8	314.2a	208.2a	302.8b	7.4c
	测控施肥	196.8	299.9a	200.7a	295.9b	8.1c
	垄膜沟播	196.8	319.8a	191.5b	325.1a	9.6b
	平膜穴播	196.8	315.9a	179.6c	333.1a	10.7a
平均值	农户模式	162.0	323.4a	206.6a	278.8c	13.4c
	测控施肥	162.0	327.6a	205.2a	281.3c	13.8c
	垄膜沟播	162.0	331.4a	191.9b	301.6b	15.7b
	平膜穴播	162.0	343.8a	185.3c	309.6a	17.1a
F 值	年份 Y		1.4	2.0	8.1**	111.4**
	处理 T		1.8	2.3	7.5**	28.3**
	年份×处理 Y×T		1.1	0.1	0.2	3.9**

2.3 减氮覆膜对黄土旱塬冬小麦养分利用的影响

2.3.1 减氮覆膜对黄土旱塬冬小麦氮肥利用效率的影响 由表 5 可知, 减氮测控施肥较农户模式在 5 年总施氮量减少 46.9% 的情况下, 氮肥收获指数提高 4.3%, 这可能是由于农户模式过高的氮肥施用量导致地上部分总吸氮量的增加速率要高于籽粒中氮素

的吸收速率, 导致农户模式氮肥收获指数下降。减氮测控施肥的氮肥偏生产力较农户模式提高 120.3%, 这是由减氮测控施肥较农户模式在减少氮肥施用量的情况下, 冬小麦产量却得到了提升。在减氮测控施肥基础上进行覆膜种植, 垄膜沟播和平膜穴播较不覆膜收获指数提高 1.7%~3.5%, 偏生产力提高 21.7%~

41.4%,生理指数降低 8.7%~16.8%。这可能是由于地膜覆盖对土壤水分和养分的调节作用增加了地上部分和籽粒对氮素的吸收量,使得氮肥的收获指数提高而生理指数却降低。在相同的施肥量下,地膜覆盖可有效提高冬小麦的作物产量,从而提高了氮肥的偏生产力。 F 值检验表明,不同年份、不同处理以及年份和处理的交互作用对黄土旱塬冬小麦氮肥的偏生产力均达到极显著水平,不同年份和不同处理对氮肥的收获指数达到极显著水平。

表 5 2013—2018 年不同种植模式下氮肥利用效率

年份	处理	氮收获 指数/%	氮生理效率/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮偏生产力/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
2013—2014	农户模式	63.1b	40.7a	28.2d
	测控施肥	65.8ab	40.9a	34.1c
	垄膜沟播	66.9a	38.6b	41.5b
	平膜穴播	68.1a	37.1b	49.2a
2014—2015	农户模式	74.7a	42.5a	29.0d
	测控施肥	78.6a	42.3a	89.9c
	垄膜沟播	78.9a	34.5b	98.4b
	平膜穴播	79.1a	35.4b	110.1a
2015—2016	农户模式	81.9a	45.1a	19.5d
	测控施肥	83.8a	45.7a	48.9c
	垄膜沟播	80.2a	44.2a	66.0b
	平膜穴播	82.5a	36.5b	82.7a
2016—2017	农户模式	68.4a	47.6a	28.8c
	测控施肥	70.2a	47.0a	49.7b
	垄膜沟播	75.6a	48.6a	61.5a
	平膜穴播	80.7a	42.5b	69.5a
2017—2018	农户模式	27.5c	26.1a	14.90d
	测控施肥	30.7b	26.4a	42.86c
	垄膜沟播	32.8a	27.2a	55.36b
	平膜穴播	30.2b	24.3a	63.91a
平均值	农户模式	63.1b	40.4a	24.1d
	测控施肥	65.8ab	40.5a	53.1c
	垄膜沟播	66.9ab	38.6ab	64.6b
	平膜穴播	68.1a	35.2b	75.1a
F 值	年份 Y	39.2**	19.6**	75.7**
	处理 T	6.5**	1.2	184.8**
	年份×处理 Y×T	0.3	0.5	6.8**

2.3.2 减氮覆膜对黄土旱塬冬小麦磷肥利用效率的影响 由表 6 可知,农户模式与减氮测控施肥在磷肥的收获指数和偏生产力方面无显著差异,减氮测控施肥的磷肥生理效率较农户模式降低 11.0%,说明减氮测控施肥可促进冬小麦地上部分磷素的吸收量。在减氮测控施肥基础上进行地膜覆盖,垄膜沟播和平膜穴播较不覆膜在磷肥的收获指数和生理效率方面无显著差异,可提高磷肥偏生产力 22.4%~39.2%,差异达显著水平,说明地膜覆盖可提升冬小麦对磷肥的

利用效率。 F 值检验表明,不同年份、不同处理以及年份和处理的交互作用对黄土旱塬冬小麦磷肥的偏生产力均达到极显著水平。

表 6 2013—2018 年不同种植模式下磷肥利用效率

年份	处理	磷收获 指数/%	磷生理效率/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	磷偏生产力/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
2013—2014	农户模式	55.7a	144.0a	161.3b
	测控施肥	54.5a	107.9c	164.0b
	垄膜沟播	56.2a	126.6b	196.9ab
	平膜穴播	55.1a	144.5a	234.7a
2014—2015	农户模式	60.4a	63.1a	72.5a
	测控施肥	57.3a	59.4b	58.8c
	垄膜沟播	58.8a	52.9c	68.1b
	平膜穴播	60.7a	58.0b	76.0a
2015—2016	农户模式	64.8a	106.1a	48.7b
	测控施肥	64.8a	98.3b	43.0c
	垄膜沟播	63.8a	89.4c	57.9a
	平膜穴播	62.0a	88.7c	56.6a
2016—2017	农户模式	47.1a	66.3a	28.8d
	测控施肥	45.7a	67.6a	60.3c
	垄膜沟播	52.3a	58.9b	74.6b
	平膜穴播	49.1a	54.5b	84.3a
2017—2018	农户模式	50.6a	84.1a	37.3a
	测控施肥	50.3a	79.5ab	21.6d
	垄膜沟播	49.7a	74.0b	27.9c
	平膜穴播	48.4a	75.0b	32.2b
平均值	农户模式	55.7a	92.7a	69.7c
	测控施肥	54.5a	82.5b	69.5c
	垄膜沟播	56.2a	80.4b	85.1b
	平膜穴播	55.1a	84.1b	96.76a
F 值	年份 Y	5.9	30.7**	177.3**
	处理 T	3.4	0.5	18.5**
	年份×处理 Y×T	0.1	0.7	4.6**

2.3.3 减氮覆膜对黄土旱塬冬小麦钾肥利用效率的影响 由表 7 可知,减氮测控施肥与农户模式在钾肥的收获指数上无显著差异。在减氮测控施肥基础上进行地膜覆盖,2014 年和 2015 年地膜覆盖下的钾肥生理效率要低于不覆膜,而 2016—2018 年地膜覆盖下的钾肥生理效率要高于不覆膜,从 5 年总体情况来看,垄膜沟播和平膜穴播的钾肥生理效率较不覆膜提高 3.8%~7.5%。造成生理效率差异的原因可能是由于不同年份地膜覆盖使冬小麦产量的增加速率与冬小麦对钾素的吸收速率不同造成的。垄膜沟播和平膜穴播钾肥的偏生产力较不覆膜提高 19.3%~37.1%,差异达显著水平。在相同的施肥量条件下,地膜覆盖良好的水肥调节作用增加了冬小麦产量,从而提高了钾肥的偏生产力。 F 值检验表明,不同年份、不同处

理对黄土旱塬冬小麦钾肥的生理效率和偏生产力均达到极显著水平。

表 7 2013—2018 年不同种植模式下钾肥利用效率

年份	处理	钾收获指数/%	钾生理效率/ (kg·kg ⁻¹)	钾偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)
2013—2014	农户模式	14.8a	—	—
	测控施肥	15.0a	19.8c	192.1b
	垄膜沟播	15.6a	30.5b	235.8ab
	平膜穴播	14.4a	34.9a	279.4a
2014—2015	农户模式	11.2a	—	—
	测控施肥	12.2a	28.6b	92.2b
	垄膜沟播	12.4a	29.3b	93.2b
	平膜穴播	12.0a	33.6a	107.0a
2015—2016	农户模式	19.8a	—	—
	测控施肥	18.2a	43.6a	66.3c
	垄膜沟播	20.4a	41.3b	88.9b
	平膜穴播	18.4a	41.2b	96.9a
2016—2017	农户模式	13.7b	—	—
	测控施肥	13.9b	41.4a	141.8c
	垄膜沟播	15.4a	39.0ab	175.6b
	平膜穴播	14.9a	37.7b	198.4a
2017—2018	农户模式	10.5b	—	—
	测控施肥	11.6a	25.8a	94.8c
	垄膜沟播	10.3b	24.9a	106.9b
	平膜穴播	8.2c	23.7a	123.4a
平均值	农户模式	14.0a	—	—
	测控施肥	14.2a	31.8b	117.4c
	垄膜沟播	14.8a	33.0ab	140.1b
	平膜穴播	13.6a	34.2a	161.0a
F 值	年份 Y	13.1*	21.1**	44.6**
	处理 T	3.9	7.3**	24.3**
	年份×处理 Y×T	0.6	1.9	1.7

3 讨论

3.1 减氮覆膜对黄土旱塬冬小麦产量构成影响分析

合理的氮肥施用可促进冬小麦根系的生长,增加水肥利用效率,进而获得高产,但过量施用氮肥会降低小麦有效成穗率,最终导致产量降低^[11]。前人^[12-14]研究表明,在传统施肥基础上适量减少氮肥施用量并不会减少冬小麦的籽粒产量和生物产量,反而能促进冬小麦对氮素的吸收利用,降低氮素的表现损失,提高氮肥的利用率。本研究表明,减氮测控施肥较农户模式在 5 年总施氮量减少 46.9% 的情况下,年均籽粒产量、生物产量和公顷穗数分别增加 4.4%、4.0% 和 4.3%,进一步证明了在黄土旱塬冬小麦种植区减施氮肥的可行性。

不同区域降水时空分布和土壤贮水能力差异是造成黄土旱塬冬小麦产量不同的主要原因,合理的水肥管理可有效提高旱地小麦的生产能力^[2]。前人^[2]研究表明,黄土高原冬小麦产量形成主要取决于穗

数,其次是千粒重,因此调控穗数是实现冬小麦增产的主要途径。全膜穴播种植行距小,可增加冬小麦种植密度和群体穗数,同时有利于冬小麦各生长因素的协调增长,可改善冬小麦生长初期的热量条件,促进碳水化合物的形成,从而提高干物质含量,实现增产效果^[15]。本研究表明,垄膜沟播和平膜穴播的籽粒产量、生物产量、穗数和千粒重较不覆膜分别增加 21.0%、39.2%、18.2%、4.7% 和 23.5%、40.3%、27.6%、7.0%,平膜穴播的增加效果更显著。

有研究^[16]表明,冬小麦的产量与夏闲期的降雨量呈正相关,冬小麦 1/2 以上的产量取决于播前墒情的好坏。本试验在 2015 年的冬小麦产量较 2013 年、2014 年和 2016 年分别降低 30.82%、28.84% 和 32.45%,主要因为 2015 年夏闲期的降雨量仅为 140.3 mm,而其余 3 年降雨量分别为 464.7、413.3、357.6 mm,进一步说明了夏闲期降水量对旱作麦区产量的重要作用。2017 年冬小麦产量较低与 2017 年春天发生的冻害有关。

3.2 覆膜措施对黄土旱塬冬小麦耗水量及水分生产效率影响分析

黄土旱塬冬小麦种植区降水较少且分布不均,因此高效利用自然降水和土壤深层水分成为解决干旱的重要措施。解文艳等^[17]通过 6 年试验研究表明,地膜覆盖可使 0—200 cm 土层平均土壤贮水量较不覆膜增加 3.5%~8.8%,可提高水分利用效率 15.87%。本研究表明,较不覆膜种植,地膜覆盖可使水分利用效率增加 13.8%~23.9%,平膜穴播的保水作用更加明显。主要因为地膜覆盖会阻碍土壤水汽向大气蒸散,在土壤与大气之间形成相对独立的水分循环系统,增加水分在土壤中的横向运动,从而降低土壤水分的无效蒸发,同时地膜覆盖可增加对深层水的利用效率,减少全生育期蒸发量,增加作物全生育期蒸腾量,降低蒸发与蒸散的比例,从而提高水分的利用效率^[18-20]。本研究结果表明,地膜覆盖在生育期耗水量较不覆膜增加 7.1%~10.1%,主要因为地膜覆盖下较高的生物产量和作物产量导致土壤水分消耗较多,从而降低了收获期土壤含水量^[14]。

3.3 减氮覆膜对黄土旱塬冬小麦氮、磷、钾肥利用效率影响分析

在传统施肥的基础上,适当减少氮肥施用量,增加钾肥用量能显著改善氮、钾营养状况,增大冬小麦冠层叶片间氮素垂直分布梯度,提高叶片氮素转移量和籽粒的贡献率,从而提高籽粒产量和氮素的利用效率^[21]。本研究结果表明,减氮测控施肥较农户模式在 5 年总施氮量减少 46.9% 的情况下,氮肥收获指数

提高4.3%,偏生产力提高120.3%。主要因为农户模式过量的施用氮肥,促进植株对氮素的吸收,增加各营养器官中氮素的积累量,使地上部分总吸氮量增加,但过量施用氮肥会延缓植株衰老,降低花后营养器官氮素向籽粒的转移率,不利于籽粒中氮素的积累,从而降低氮肥收获指数^[22]。减氮测控施肥较农户模式在减少氮肥施用量的情况下,籽粒产量却增加4.4%,从而获得较高的氮肥偏生产力。

张嫚等^[4]研究表明,当土壤含水量较少时,导致植株对氮素的吸收量减少,使得籽粒中的氮素积累量不能得到很大提高,而地膜覆盖具有良好的保水效果,可提高小麦花前营养器官氮素向籽粒的转移率和花后吸氮量,从而提高了氮素的收获指数。屈会峰等^[14]研究表明,与不覆膜相比,地膜覆盖下的冬小麦产量增加速率小于地上部分吸氮量的速率,从而提高了籽粒产量形成的需氮量,降低了氮肥的生理效率;张勉等^[23]研究表明,在相同的施肥条件下,地膜覆盖对土壤良好的水肥调节作用可显著提高冬小麦的产量,因此垄膜沟播和平膜穴播较不覆膜具有更高的氮肥偏生产力。本研究结果表明,在减氮测控施肥基础上进行覆膜种植,垄膜沟播和平膜穴播较不覆膜氮肥收获指数提高1.7%~3.5%,偏生产力提高21.7%~41.4%,生理指数降低8.7%~16.8%。

在我国北方地区,由于重氮轻磷钾的施肥方式,随着农业生产的不断发展,土壤缺乏磷素和钾素已经开始成为农业发展的限制因素,尽管当地速效钾含量较高,但长期不施钾肥必定会影响冬小麦的产量和品质。屈会峰等^[14]研究表明,黄土高原属于碱性土,土壤有效磷活性低,降低了冬小麦对磷的吸收效率,冬小麦对土壤磷素的吸收能力与土壤磷素的供应能力有直接关系。在本试验中,减氮测控施肥采用0—40 cm土层磷钾恒量施肥技术,在5年种植过程中磷肥总施用量较农户模式增加28.6%,磷肥生理效率较农户模式降低11.0%,由于减氮测控施肥的产量较农户模式增加4.4%,所以减氮测控施肥可增加冬小麦地上部分对磷素的吸收量。何刚等^[24]研究表明,地膜覆盖改变了土壤的温度和湿度,使土壤中的缓效养分变为速效养分,从而提高了土壤中的速效钾含量,随着地膜覆盖时间的延长,速效钾在土壤表层富集量增大,同时也促进了冬小麦对钾素的吸收量。在本试验连续5年种植过程中,2014年和2015年地膜覆盖下的钾肥生理效率要低于不覆膜,而2016—2018年地膜覆盖下的钾肥生理效率要高于不覆膜,从5年总体情况来看,地膜覆盖下的钾肥生理效率较不覆膜提高3.8%~7.5%,可能是因为

在不同的种植年份冬小麦产量的增加速率与冬小麦对钾素吸收速率不同造成的。减氮测控施肥以及在其基础上的覆膜种植施用的磷肥和钾肥数量相同,地膜覆盖对土壤有效的水肥调节使冬小麦产量增加,因此垄膜沟播和平膜穴播的氮肥和磷肥偏生产力较不覆膜分别提高22.4%~39.2%和19.3%~37.1%。

4 结论

在黄土旱塬冬小麦种植区,经过连续5年种植,减氮测控施肥采用“0—100 cm土壤硝态氮监控施肥,0—40 cm土层磷钾恒量施肥”技术,较农户模式在减少氮肥施用量46.9%,平衡施用磷钾肥的情况下,冬小麦年均籽粒产量、生物产量和公顷穗数分别增加了4.4%,4.0%和4.3%,氮肥收获指数和偏生产力分别提高4.3%和120.3%,同时促进了冬小麦地上部分和籽粒对磷素和钾素的吸收量,进一步证明了在黄土旱塬冬小麦种植区减施氮肥的可行性。

在减氮测控施肥基础上进行覆膜种植,地膜覆盖使土壤水分利用效率和生育期耗水量分别增加13.8%~23.9%和7.1%~10.1%,同时使氮肥收获指数提高1.7%~3.5%,偏生产力提高21.7%~41.4%,生理效率降低8.7%~16.8%,使磷肥和钾肥的偏生产力分别提高22.4%~39.2%和19.3%~37.1%。地膜覆盖良好的水肥调节效果使垄膜沟播和平膜穴播的籽粒产量、生物产量、公顷穗数和千粒重较不覆膜分别增加21.0%,39.2%,18.2%,4.7%和23.5%,40.3%,27.6%,7.0%,平膜穴播的增加效果更显著。

可见,在黄土旱塬冬小麦种植区采用减氮测控定量施肥技术与地膜覆盖措施相结合的种植方式可实现小麦增产和肥料增效的作用,从而达到高效安全持续生产的目的,在农业生产实践中可推广应用。

参考文献:

- [1] 于飞,施卫明.近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J].土壤学报,2015,52(6):1311-1324.
- [2] 李廷亮,谢英荷,高志强,等.黄土高原旱地小麦覆膜增产与氮肥增效分析[J].中国农业科学,2018,51(14):2735-2746.
- [3] 董强,吴得峰,党廷辉,等.黄土高原南部不同减氮模式对春玉米产量及土壤硝态氮残留的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):856-863.
- [4] 张嫚,周苏玫,杨习文,等.减氮适墒对冬小麦土壤硝态氮分布和氮素吸收利用的影响[J].中国农业科学,2017,50(20):3885-3897.
- [5] 毛海兰,付鑫,赵丹丹,等.秸秆与地膜覆盖条件下旱作玉米田土壤氮组分生长季动态[J].水土保持学报,2018,32(4):246-254.

- [6] 尹光华, 佟娜, 郝亮, 等. 不同材料膜覆盖对土壤水分和花生产量的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 204-207, 250.
- [7] 任江波, 李钠钾, 秦平伟, 等. 不同覆盖材料对土壤理化性状和微生物量碳氮含量的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(10): 2140-2145.
- [8] Dong Q, Dang T H, Guo S L, et al. Effect of different mulching measures on nitrate nitrogen leaching in spring maize planting system in south of Loess Plateau[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 654-658.
- [9] 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.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [11] 尹飞, 王俊忠, 孙笑梅, 等. 夏玉米根系与土壤硝态氮空间分布吻合度对水氮处理的响应[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2166-2178.
- [12] 李银坤, 郝卫平, 龚道枝, 等. 减氮配施有机肥对夏玉米——冬小麦土壤硝态氮及氮肥利用的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(2): 348-354.
- [13] 彭正萍, 刘亚男, 李迎春, 等. 持续氮素调控对小麦/玉米轮作系统氮素利用和表观损失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 74-79.
- [14] 屈会峰, 刘吉飞, 赵护兵. 减氮结合不同覆盖对冬小麦产量、水氮利用及根系的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(10): 2270-2276.
- [15] 杜雄, 张永升, 王磊, 等. 不同种植制度与土下微膜覆盖的小麦玉米水分利用效果[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 226-234.
- [16] 屈会峰, 赵护兵, 刘吉飞, 等. 不同覆盖措施下旱地冬小麦的氮磷钾需求及其生理效率[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 874-882.
- [17] 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 旱地春玉米地表覆盖对土壤硝态氮残留的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 158-164.
- [18] 付鑫, 王俊, 赵丹丹. 地膜覆盖对黄土高原旱作春玉米田土壤碳氮组分的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 239-243.
- [19] 彭正凯, 李玲玲, 谢军红, 等. 不同耕作措施对旱地作物生育期农田耗水结构和水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 214-221.
- [20] 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 不同覆盖方式对旱地春玉米土壤水分及作物生产力的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 128-133.
- [21] 李廷亮, 谢英荷, 高志强, 等. 周年覆盖对黄土旱塬冬小麦产量及降水利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 332-338.
- [22] 辛思颖, 翁玲云, 吕敏娟, 等. 施氮量对冬小麦—夏玉米土壤氮素表观盈亏的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 257-263, 269.
- [23] 张勉, 孙敏, 高志强, 等. 年际间周年覆盖保水对旱地小麦植株氮素利用的调控研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 253-261.
- [24] 何刚, 王朝辉, 李富翠, 等. 地表覆盖对旱地小麦氮磷钾需求及生理效率的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1657-1671.
- (上接第104页)
- [24] Zhao Y F, Zou X Q, Gao J H, et al. Quantifying the anthropogenic and climatic contributions to changes in water discharge and sediment load into the sea: A case study of the Yangtze River, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 536: 803-812.
- [25] Han J Q, Gao J E, Luo H. Changes and implications of the relationship between rainfall, runoff and sediment load in the Wuding River basin on the Chinese Loess Plateau[J]. *Catena*, 2019, 175: 228-235.
- [26] Hu J F, Gao P, Mu X M, et al. Runoff-sediment dynamics under different flood patterns in a Loess Plateau catchment, China[J]. *Catena*, 2019, 173: 234-245.
- [27] 孔令桥, 张路, 郑华, 等. 长江流域生态系统格局演变及驱动力[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 741-749.
- [28] 高俊刚, 吴雪, 张懿铨, 等. 基于等级层次分析法的金沙江下游地区生态功能分区[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 134-147.
- [29] 刘祖英, 王兵, 赵雨森, 等. 典型区域退耕还林工程生态区划[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(3): 93-100.
- [30] Kong L Q, Zheng H, Rao E M, et al. Evaluating indirect and direct effects of eco-restoration policy on soil conservation service in Yangtze River Basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631/632: 887-894.