

不同覆盖措施下旱地冬小麦的氮磷钾需求及其生理效率

屈会峰¹, 赵护兵^{1*}, 刘吉飞¹, 黄鸿博², 王朝辉¹, 翟丙年¹

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2 陕西乾县农业技术推广站, 陕西乾县 713300)

摘要:【目的】目前西北旱地小麦水肥管理与保水栽培多集中于产量和水分利用效率的研究, 养分效率以及养分吸收后形成小麦籽粒产量和养分含量能力的报道相对较少。本研究探讨了不同覆盖措施对黄土高原旱地冬小麦氮磷钾需求和生理效率的影响, 为提高黄土高原旱地冬小麦养分效率, 以及为促进小麦的高效优质生产提供理论依据。【方法】以冬小麦为供试作物, 在陕西省永寿县连续进行了4年田间定位试验, 以不施氮肥为对照, 施N 195 kg/hm² (N1农户模式)、N 150 kg/hm² (N2农户减氮), 全膜穴播、垄覆沟播和秸秆覆盖, 共6个处理, 3个覆盖处理施氮量均为150 kg/hm²。调查分析了冬小麦籽粒产量、籽粒养分含量、籽粒产量形成和籽粒养分含量形成的氮磷钾需求及生理效率。【结果】减氮无覆盖处理较常规施氮处理籽粒产量形成的需氮量显著降低5.3%, 其他指标均无显著性差异。在150 kg/hm²施氮条件下, 与无覆盖相比, 垒覆沟播的产量未增加, 但提高了地上部吸氮量, 籽粒产量形成的需氮量显著增加2.6%, 籽粒产量形成的氮生理效率降低6.3%; 全膜穴播籽粒产量显著增加6.9%, 地上部吸氮量提高11.3%; 秸秆覆盖产量增加3.5%, 地上部吸氮量显著增加13.2%, 籽粒产量形成的需氮量显著增加8.5%, 籽粒产量形成的氮生理效率降低3.9%。与相同施氮量无覆盖相比, 垒覆沟播地上部吸磷量和吸钾量未增加, 全膜穴播地上部吸磷量和吸钾量分别显著增加15.6%、23.4%, 籽粒产量形成的钾生理效率显著降低10.6%; 秸秆覆盖地上部吸磷量和吸钾量分别显著增加13.2%、24.4%, 籽粒产量形成的磷、钾生理效率分别显著降低9.9%、15.1%。在施氮量由195 kg/hm²减至150 kg/hm²后, 与无覆盖相比, 采用垄覆沟播技术未能增加小麦产量, 但增加了地上部的吸氮量, 从而提高了籽粒产量形成的需氮量, 降低了氮的生理效率; 采用全膜穴播技术提高了籽粒产量, 同时增加地上部吸氮量, 但未增加籽粒产量形成的需氮量和氮生理效率; 采用秸秆覆盖技术增加了产量, 同时增加地上部吸氮量, 而籽粒产量形成的需氮量也增加, 从而降低了籽粒产量形成的氮生理效率。【结论】旱地小麦生产中为保证籽粒产量和营养品质, 需增加地膜覆盖和秸秆覆盖的氮肥用量。

关键词:减氮; 覆盖; 籽粒产量; 养分含量; 养分需求量; 生理效率

NPK requirements and their physiological efficiencies for winter wheat under different cover measures in dryland

QU Hui-feng¹, ZHAO Hu-bing^{1*}, LIU Ji-fei¹, HUANG Hong-bo², WANG Zhao-hui¹, ZHAI Bing-nian¹

(1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Qian County Agricultural Technology Extension Station of Shaanxi Province, Qianxian, Shaanxi 713300, China)

Abstract:【Objectives】Water and fertilizer management and water-conserved cultivation have been the research focuses in wheat production of the Northwest China. More attention has concentrated on the yield and water use efficiency and less on nutrient uptakes and efficiencies after the formation of wheat grain yield. So in this paper, effects of different cover measures on N, P and K requirements and physiological efficiencies of winter wheat were studied in dryland of Loess Plateau.【Method】Using winter wheat as the test crop, continuous field trials were conducted for 4 years in Yongshou County, Shaanxi Province. No nitrogen fertilizer was set as the

收稿日期: 2016-12-13 接受日期: 2017-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(31272250); 国家科学技术支撑计划(2015BAD23B04); 农业公益性行业科研专项(201503124)资助。

作者简介: 屈会峰(1992—), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生, 主要从事植物营养与调控方面的研究。E-mail: quhifeng1992@126.com

*通信作者 E-mail: zhaohubing@hotmail.com

blank, applying N 195 kg/hm² as control. Other 4 treatments were designed as following: N150 kg/hm² without cover, N150 kg/hm² and film mulching and hole sowing, N150 kg/hm² and ridge mulching and furrow sowing, N150 kg/hm² and straw mulching and hole sowing. Physiological demands and efficiencies of N, P and K for winter wheat grain yields, grain nutrient contents and yield of grain formation were analyzed by measuring the sample plants. **[Results]** The nitrogen requirement of non-covering treatment was 5.3% lower than that of conventional nitrogen application, other indicators had no significant differences. Under the N 150 kg/hm² application conditions, compared with no coverage, the yield of ridge mulching and furrow sowing was not increased, while the aboveground N uptake was increased, and the nitrogen requirement of grain yield was increased by 2.6%, the N physiological efficiency of grain yield was reduced by 6.3%. The yield of film mulching and hole sowing was increased by 6.9%, the aboveground N uptake was increased by 11.3%; the yield of straw mulching and hole sowing was increased by 3.5%, the aboveground N uptake was increased by 13.2%, and the N requirement of grain yield was increased by 8.5%, the N physiological efficiency of grain yield was reduced by 3.9%. Compared with the treatment of same amount of nitrogen applied without cover, the aboveground P and K uptake of ridge mulching and furrow sowing was not increased, that of film mulching and hole sowing was increased by 15.6% and 23.4%, the K physiological efficiency of grain yield was reduced by 10.6%; the aboveground P and K uptake of straw mulching and hole sowing was increased by 13.2% and 24.4%, the P and K physiological efficiency of grain yield was reduced by 9.9% and 15.1%. After reducing the amount of N applied from 195 kg/hm² to 150 kg/hm², compared with no coverage, using ridge mulching and furrow sowing technology failed to increase wheat yield, but increased the aboveground N uptake, thereby increasing the N requirement of grain yield, reducing the N physiological efficiency. Using the film mulching and hole sowing technology improved the grain yield, increased the aboveground N uptake, therefore did not increase the N requirement of grain yield and the N physiological efficiency. Using straw mulching and hole sowing technology increased grain yield, and increased the aboveground N uptake, the N requirement of grain yield was also increased, thereby reduced the N physiological efficiency. **[Conclusions]** Therefore, to ensure grain yield and nutrient quality in dryland wheat production, the amount of nitrogen fertilizer should be increased under the plastic mulching and straw mulching.

Key words: nitrogen reduction; cover measure; grain yield; nutrient content; nutrient requirement; physiological efficiency

由于人口不断增加和经济快速发展, 导致粮食消耗量和需求量持续增长, 保证粮食作物可持续增产成为全球面临的重大问题之一^[1-2]。旱地约占全球陆地面积的40%, 养育着40%的世界人口^[3], 旱地农业对保证全球粮食安全有重要意义。地膜覆盖是旱地广泛使用的地表覆盖方式, 它能够减少水分蒸发、改善地面温度, 进而提高作物产量^[4-5]。大量文献报道了地膜覆盖的增产效应, Charkraborty等^[6]和Gao等^[7]研究表明在冬小麦生育期覆盖地膜分别增产12%和21%。地膜覆盖也能改变作物的养分吸收能力。Yuan等^[8]在水稻生育期覆盖地膜使其地上部吸氮量增加27%。Iqbal等^[9]在冬小麦生育期覆盖地膜使其地上部吸氮量也增加10%。然而, 陈小莉等^[10]却发现在春玉米生育期覆盖地膜对地上部吸氮量无影响。此外, 稼秆覆盖也能减少地表水分蒸发, 增

加土壤贮水量, 提高作物产量。Devkota等^[11]证实稼秆覆盖使小麦产量增加5%, 玉米产量增加10%。稼秆还田也会影响作物的养分吸收。在氮肥用量为325 kg/hm²时, 玉米稼秆还田使下季小麦吸氮量增加7%^[12]; 而在氮肥用量为120 kg/hm²时, 水稻稼秆还田使下季小麦吸氮量减少9%^[13]; 同时, 休闲期覆盖促进了小麦植株对氮素的吸收和积累, 增加了花后氮素积累量以及籽粒氮素积累量, 提高了氮素收获指数和氮素生产效率^[14]; 但也有研究表明, 全程地膜覆盖并没有使春小麦和冬小麦产量、吸氮量和氮效率大幅度提高^[15]。综上所述, 不同地表覆盖方式调控作物产量、养分吸收量的效果不同, 且相同地表覆盖的作物产量形成和养分利用因地点而异。

西北地区特殊的生态环境, 水肥管理与保水栽培一直是研究的重点。但目前多集中于产量和水分

利用效率的研究,养分效率以及养分吸收后形成小麦籽粒产量和养分含量能力的报道相对较少。为此本试验在陕西省永寿县御驾宫村黄土高原渭北旱地冬小麦种植区布置4年田间定位试验,旨在研究旱地氮肥用量、地表覆盖对旱地冬小麦产量、氮磷钾需求及生理效率的影响,为旱地小麦增产增效和优质生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于黄土高原典型旱作雨养农业区陕西省永寿县御驾宫村,东经 35.7° ,北纬 108.2° ,海拔995 m。该区属暖温带半湿润大陆性气候,年均气温在 10.8°C 左右,年平均降雨量为601.6 mm左右,主要集中在7~9月份。潜在蒸发量为807.4 mm,0—20 cm耕层土壤pH为8.1,有机质平均含量为11.7 g/kg,全氮0.87 g/kg,硝态氮14.5 mg/kg,铵态氮2.7 mg/kg,有效磷10.7 mg/kg,速效钾99.9 mg/kg,容重为1.25 g/cm³。试验于2012年9月到2016年6月进行,共4季。2012~2013、2013~2014、2014~2015和2015~2016年的年降水量分别为415、545、631和414 mm。根据Sun等^[16]的降水分类方法及当地长期的降水资料(1957~2014年),年降水量>671 mm为丰水年,年降水量<492 mm为欠水年,年降水量介于二者之间为平水年,故2012~2013和2015~2016年属欠水年,2013~2014和2014~2015年属平水年。

1.2 试验设计

试验以不施氮肥为对照,设施氮肥195 kg/hm²(N1农户模式)、150 kg/hm²(N2农户减氮),及垄覆沟播(RMFS),全膜穴播(FMHS)和秸秆覆盖(SMHS),共6个处理,两个氮肥处理为常规平作,行宽20 cm,无覆盖。3个覆盖处理施氮量均为150 kg/hm²。垄覆沟播:垄上覆膜,沟内覆秸秆,播种在沟内,垄沟比30 cm:30 cm,覆秸秆量为2250 kg/hm²(干重)。全膜穴播:地表全部用地膜覆盖,进行点播种植,株距12 cm,每穴播10粒。秸秆覆盖:覆秸秆量10000 kg/hm²(干重),全覆盖。垄覆沟播、全膜穴播和秸秆覆盖在休闲期保持相应的地表覆盖,在播种前去除地表覆盖,待播种后再重新覆盖。全膜穴播和秸秆覆盖处理夏闲期免耕,其他处理均三伏天深耕1次,播前7天旋耕1次。试验采用完全随机区组设计,重复4次,小区面积48 m²(12 m×4 m),小麦品种为运旱20410。冬小麦生育

期间无任何补充灌溉,人工控制杂草,不施入任何除草剂,且无明显病虫害发生。氮磷肥均作为底肥使用,氮肥用尿素(氮含量46%),磷肥用过磷酸钙(P_2O_5 含量12%),两种肥料在小麦播种前均匀撒入小区,翻入土壤耕层后耙平。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 样品采集 小麦收获期采集植物样品,每个小区中间选取3 m²样方,小麦植株连根拔起,于根茎结合处剪掉根系后,将小麦分为穗和茎叶风干后,再将穗分为籽粒和颖壳,然后称量籽粒、颖壳和茎叶风干重。取100 g籽粒、50 g颖壳和50 g茎叶烘干后作为化学分析样品。

1.3.2 样品测定 植物样品(籽粒、颖壳和茎叶)烘干粉碎后用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 法消解,用连续流动分析仪(Auto analysis 3)测定消解液的氮和磷素,用火焰光度计测定消解液的钾素。

1.4 数据计算

1.4.1 地上部氮(磷、钾)吸收量 地上部氮(磷、钾)吸收量是指作物在整个生育期地上部吸收的氮(磷、钾)量,反映作物从土壤携出养分能力。计算公式:

地上部氮(磷、钾)吸收量(kg/hm²)=[籽粒含氮(磷、钾)含量×籽粒产量+茎叶氮(磷、钾)含量×茎叶生物量+颖壳氮(磷、钾)含量×颖壳生物量]/1000。

1.4.2 穗粒产量形成的养分需求量、养分生理效率 穗粒产量形成的养分需求量,指小麦生产100 kg籽粒产量需要的地上部养分吸收量,反映作物形成籽粒产量对养分的需求情况。计算公式如下:

百公斤籽粒氮(磷、钾)需求量(kg/kg)=地上部吸氮(磷、钾)量/产量×100。

籽粒产量形成的养分生理效率,指地上部吸收单位养分所能生产的籽粒产量,反映作物利用吸收的养分形成籽粒产量的能力。计算公式:

籽粒产量形成的氮(磷、钾)生理效率(kg/kg)=产量/地上部吸氮(磷、钾)量。

1.5 数据处理

试验数据均用Excel和SPSS数据处理统计软件进行分析。

2 结果

2.1 冬小麦籽粒产量和生物量

由表1可知,减氮处理产量与常规氮肥处理在4年均无显著差异。在施氮150 kg/hm²条件下,与不覆盖相比,垄覆沟播的产量在2012~2013欠水年显

表 1 不同处理冬小麦籽粒产量和生物量 (kg/hm^2)

Table 1 Effects of different treatments on grain yields and biomass of winter wheat

处理 Treatment	2012~2013		2013~2014		2014~2015		2015~2016		平均值 Average	
	籽粒 Grain	生物量 Biomass								
CK	2850 c	5925 c	5224 c	11551 c	3292 c	8823 d	2295 c	6248 c	3415 c	8136 c
N1	4300 ab	8850 ab	6874 b	16626 b	7344 b	17368 c	7115 a	16358 a	6408 ab	14800 bc
N2	3775 b	7950 b	7049 b	16601 b	7265 b	17183 c	6763 ab	15278 b	6213 b	14253 c
RMFS	4367 a	9400 a	6774 b	17058 b	7048 b	16557 c	6405 ab	15485 ab	6149 b	14625 bc
FMHS	4475 a	9400 a	7599 a	19401 a	8366 a	21060 a	6115 b	15093 ab	6639 a	16238 a
SMHS	4525 a	9450 a	6786 b	17287 b	7916 a	19385 b	6388 ab	15065 ab	6429 ab	15297 ab

注 (Note) : CK—不施氮肥 No N application; N1—施氮 $195 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 无覆盖 Applying N $195 \text{ kg}/\text{hm}^2$ without mulching; N2—施氮 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 无覆盖 Applying N $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ without mulching; RMFS—垄覆沟播 Ridge mulching furrow sowing; FMHS—全膜穴播 Film mulching and hole sowing; SMHS—秸秆覆盖 Straw mulching and hole sowing. 同列数值后不同小写字母表示不同处理间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among the treatments at 0.05 level.

著增产 15.7%; 全膜穴播在 2013~2014 和 2014~2015 年两个平水年和 2012~2013 欠水年分别显著增产 7.8%、15.2% 和 18.5%; 稻秆覆盖的产量在 2014~2015 平水年和 2012~2013 欠水年分别显著增产 9.0% 和 19.9%。但垄覆沟播和稻秆覆盖 4 年平均产量相比无覆盖无显著差异, 而全膜穴播显著增产 6.8%。

不同处理对冬小麦生物量的影响在不同年际间不同。在无覆盖条件下, 减氮的小麦生物量比常规施氮在 2015~2016 欠水年显著减少 6.6%。在 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的施氮条件下, 与无覆盖相比, 垒覆沟播的生物量在 2012~2013 欠水年显著增加 18.2%; 全膜穴播的生物量在 2013~2014 和 2014~2015 年两个平水年和 2012~2013 欠水年分别显著增加 16.9%、

22.6% 和 18.2%; 稻秆覆盖的生物量在 2014~2015 平水年和 2012~2013 欠水年分别显著增加 12.8% 和 18.9%。全膜穴播和稻秆覆盖 4 年平均生物量分别比减氮无覆盖显著增加 13.9% 和 7.3%。

2.2 粟粒和稻秆养分吸收量

2.2.1 粟粒和稻秆吸氮量 比较粟粒吸氮量, 发现在不同氮肥水平下, 农户减氮的粟粒吸氮量与农户模式相比在各年份均无显著差异 (表 2)。在 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的施氮条件下, 与农户减氮相比, 稻秆覆盖的粟粒吸氮量在 2014~2015 平水年显著增加 17.3%; 垒覆沟播、全膜穴播和稻秆覆盖在 2015~2016 欠水年分别显著减少 13.9%、19.9% 和 9.5%。稻秆覆盖 4 年平均粟粒吸氮量相比农户减氮处理显著增加 3.7%。

表 2 不同处理的冬小麦籽粒和稻秆吸氮量 (kg/hm^2)

Table 2 Grain and straw N uptakes of winter wheat under different treatments

处理 Treatment	2012~2013		2013~2014		2014~2015		2015~2016		平均值 Average	
	籽粒 Grain	稻秆 Straw								
CK	22.0 a	85.2 c	20.7 b	143.6 d	14.0 c	81.6 c	12.2 d	36.2 c	17.2 c	86.7 c
N1	20.9 a	117.6 ab	24.6 a	271.9 b	20.7 b	270.6 b	19.8 ab	180.8 a	21.5 ab	210.2 ab
N2	21.3 a	105.8 bc	25.8 a	251.1 c	19.7 b	242.6 b	20.1 a	170.3 a	21.7 b	192.5 b
RMFS	21.7 a	126.5 a	26.1 a	271.2 b	20.1 b	249.6 b	17.3 c	136.2 b	21.3 b	195.9 ab
FMHS	22.0 a	131.4 a	25.3 a	299.6 a	20.3 b	302.9 a	16.1 c	121.6 b	20.9 b	214.2 ab
SMHS	22.6 a	136.7 a	26.0 a	278.0 ab	23.1 a	313.0 a	18.2 bc	143.8 b	22.5 a	217.9 a

注 (Note) : CK—不施氮肥 No N application; N1—施氮 $195 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 无覆盖 Applying N $195 \text{ kg}/\text{hm}^2$ without mulching; N2—施氮 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 无覆盖 Applying N $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ without mulching; RMFS—垄覆沟播 Ridge mulching furrow sowing; FMHS—全膜穴播 Film mulching and hole sowing; SMHS—稻秆覆盖 Straw mulching and hole sowing. 同列数值后不同小写字母表示不同处理间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among the treatments at 0.05 level.

秸秆吸氮量结果表明(表2),在不同氮肥水平下,农户减氮的秸秆吸氮量相比农户模式在2013~2014平水年显著减少7.6%。在150 kg/hm²的施氮条件下,与农户减氮相比,垄覆沟播的秸秆吸氮量在2012~2013欠水年和2013~2014平水年分别显著增加19.6%和8.0%,而在2015~2016欠水年显著减少20.0%;全膜穴播在2013~2014和2014~2015年两个平水年和2012~2013欠水年分别显著增加19.3%、24.9%和24.2%,而在2015~2016欠水年显著减少28.6%;秸秆覆盖在2013~2014和2014~2015年两个平水年和2012~2013欠水年分别显著增加10.7%、29.0%和29.2%,而在2015~2016欠水年显著减少15.6%。秸秆覆盖4年平均秸秆吸氮量相比农户减氮显著增加13.2%。

2.2.2 粟粒和秸秆吸磷量 不同覆盖措施能够改变冬小麦的籽粒吸磷量,在不同氮肥水平下,农户减氮的籽粒吸磷量相比农户模式在各年份均无显著差异(表3)。在150 kg/hm²的施氮条件下,与农户减氮相比,垄覆沟播的籽粒吸磷量在2013~2014平水年显著增加6.7%;全膜穴播和秸秆覆盖的籽粒吸磷量各年份均无显著差异。

分析秸秆吸磷量,发现在不同氮肥水平下,农户减氮的秸秆吸磷量相比农户模式在各年份均无显著差异。在150 kg/hm²的施氮条件下,与无覆盖相比,垄覆沟播的秸秆吸磷量在2012~2013欠水年显著增加17.2%;全膜穴播在2013~2014和2014~2015年两个平水年和2012~2013欠水年分别显著增加22.8%、16.7%和30.3%;秸秆覆盖在2012~2013欠水年和2014~2015平水年分别显著增加37.4%和

14.8%。全膜穴播和秸秆覆盖4年平均秸秆吸磷量分别比农户减氮无覆盖显著增加15.6%和13.2%。

2.2.3 粟粒和秸秆吸钾量 在不同氮肥水平下,农户减氮的籽粒吸钾量相比农户模式在各年份均无显著差异(表4)。在150 kg/hm²的施氮条件下,与农户减氮无覆盖相比,各覆盖处理均无显著差异。分析秸秆吸钾量可知,在150 kg/hm²的施氮条件下,与无覆盖相比,全膜穴播在2013~2014和2014~2015年两个平水年分别显著增加28.5%和32.4%;秸秆覆盖在2013~2014和2014~2015年两个平水年和2012~2013欠水年分别显著增加27.7%、31.7%和27.0%。全膜穴播和秸秆覆盖4年平均秸秆吸钾量比农户减氮无覆盖处理分别显著增加23.4%和24.4%。

2.3 小麦籽粒产量形成的氮磷钾养分需求量和生理效率

2.3.1 小麦百公斤籽粒氮磷钾养分需求量 分析百公斤籽粒需氮量表明,在不同氮肥水平下,农户减氮的籽粒需氮量相比农户模式仅在2014~2015平水年减少9.5%(表5)。在150 kg/hm²的施氮条件下,与农户减氮相比,垄覆沟播在2013~2014平水年显著增加12.6%,而在2015~2016欠水年显著减少15.9%;全膜穴播仅在2015~2016欠水年显著减少21.4%;秸秆覆盖在2013~2014和2014~2015年两个平水年分别显著增加14.9%和18.9%,而在2015~2016欠水年显著减少11.1%。垄覆沟播、全膜穴播和秸秆覆盖4年平均需氮量相比农户减氮分别显著增加2.6%、2.0%和8.5%。

分析百公斤籽粒需磷量可知,在不同氮肥水平下,农户减氮的籽粒需磷量相比农户模式在各年份

表3 不同处理的冬小麦籽粒和秸秆吸磷量(kg/hm²)

Table 3 Grain and straw P uptakes of winter wheat under different treatments

处理 Treatment	2012~2013		2013~2014		2014~2015		2015~2016		平均值 Average	
	籽粒 Grain	秸秆 Straw								
CK	2.7 a	8.8 e	3.1 ab	18.9 c	3.2 a	12.1 c	3.4 a	9.1 c	3.1 a	12.2 c
N1	2.4 b	11.4 cd	2.9 b	28.1 b	2.9 ab	25.7 b	2.6 c	20.7 ab	2.7 c	21.4 b
N2	2.3 b	9.9 de	3.0 b	26.3 b	3.0 ab	25.7 b	2.7 bc	20.3 ab	2.7 bc	20.5 b
RMFS	2.3 b	11.6 bc	3.2 a	28.6 b	2.9 b	23.9 b	2.7 bc	18.9 b	2.8 bc	20.8 b
FMHS	2.5 ab	12.9 ab	3.1 ab	32.3 a	3.0 ab	30.0 a	3.0 bc	19.7 ab	2.9 abc	23.7 a
SMHS	2.6 ab	13.6 a	3.0 ab	28.4 b	3.1 ab	29.5 a	3.1 b	21.4 a	2.9 ab	23.2 a

注 (Note) : CK—不施氮肥 No N application; N1—施氮 195 kg/hm² 无覆盖 Applying N 195 kg/hm² without mulching; N2—施氮 150 kg/hm² 无覆盖 Applying N150 kg/hm² without mulching; RMFS—垄覆沟播 Ridge mulching furrow sowing; FMHS—全膜穴播 Film mulching and hole sowing; SMHS—秸秆覆盖 Straw mulching and hole sowing. 数值后不同小写字母表示不同处理间差异达到5%显著水平 Values followed by different small letters in a column indicate significant differences among the treatments at 0.05 level.

表4 不同处理的冬小麦籽粒和秸秆吸钾量 (kg/hm²)
Table 4 Grain and straw K uptakes of winter wheat under different treatments

处理 Treatment	2012~2013		2013~2014		2014~2015		2015~2016		平均值 Average	
	籽粒 Grain	秸秆 Straw								
CK	4.0 a	63.3 c	3.1 a	126.5 c	3.8 a	48.2 c	3.4 a	35.6 b	3.6 a	50.6 c
N1	3.8 ab	56.8 ab	2.9 a	140.1 ab	3.5 ab	131.9 b	2.9 c	102.7 a	3.3 b	107.9 ab
N2	3.7 ab	52.1 b	2.8 a	116.2 b	3.5 ab	124.4 b	3.0 bc	96.0 a	3.3 b	97.2 b
RMFS	3.6 ab	60.5 ab	3.0 a	127.1 ab	3.4 b	126.9 b	2.9 c	103.7 a	3.2 b	104.5 ab
FMHS	3.5 b	60.3 ab	2.9 a	149.3 a	3.4 b	164.7 a	3.1 bc	105.1 a	3.3 b	119.9 a
SMHS	3.8 ab	66.2 a	2.8 a	148.4 a	3.4 b	163.8 a	3.1 bc	105.2 a	3.3 b	120.9 a

注 (Note) : CK—不施氮肥 No N application; N1—施氮 195 kg/hm² 无覆盖 Applying N 195 kg/hm² without mulching; N2—施氮 150 kg/hm² 无覆盖 Applying N150 kg/hm² without mulching; RMFS—垄覆沟播 Ridge mulching furrow sowing; FMHS—全膜穴播 Film mulching and hole sowing; SMHS—秸秆覆盖 Straw mulching and hole sowing. 同列数值后不同小写字母表示不同处理间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among the treatments at 0.05 level.

表5 不同处理对冬小麦百公斤籽粒产量形成氮磷钾养分需求量的影响 (kg/100 kg)
Table 5 Nutrient requirements for 100 kg grain of winter wheat under different treatments

处理 Treatment	2012~2013	2013~2014	2014~2015	2015~2016	平均值 Average
N					
CK	2.99 a	2.73 c	2.46 d	1.58 d	2.44 d
N1	2.73 a	3.95 ab	3.68 ab	2.54 a	3.23 ab
N2	2.81 a	3.57 b	3.33 c	2.52 a	3.06 c
RMFS	2.89 a	4.02 ab	3.54 bc	2.12 bc	3.14 b
FMHS	2.93 a	3.95 ab	3.61 bc	1.98 c	3.12 b
SMHS	2.98 a	4.10 a	3.96 a	2.24 b	3.32 a
P					
CK	0.31 a	0.36 a	0.37 a	0.40 a	0.36 a
N1	0.27 a	0.41 a	0.35 a	0.29 b	0.33 b
N2	0.26 a	0.37 a	0.35 a	0.30 b	0.32 b
RMFS	0.26 a	0.42 a	0.34 a	0.30 b	0.33 b
FMHS	0.29 a	0.43 a	0.36 a	0.32 b	0.35 a
SMHS	0.30 a	0.42 a	0.37 a	0.34 b	0.36 a
K					
CK	1.39 a	1.52 c	1.47 d	1.55 ab	1.48 b
N1	1.33 a	2.03 ab	1.79 bc	1.45 bc	1.65ab
N2	1.38 a	1.63 bc	1.71 c	1.42 bc	1.54 b
RMFS	1.39 a	1.89 abc	1.80 bc	1.63 ab	1.68ab
FMHS	1.35 a	1.99 ab	1.96 ab	1.73 a	1.76 a
SMHS	1.43 a	2.20 a	2.07 a	1.65 ab	1.84 a

注 (Note) : CK—不施氮肥 No N application; N1—施氮 195 kg/hm² 无覆盖 Applying N 195 kg/hm² without mulching; N2—施氮 150 kg/hm² 无覆盖 Applying N150 kg/hm² without mulching; RMFS—垄覆沟播 Ridge mulching furrow sowing; FMHS—全膜穴播 Film mulching and hole sowing; SMHS—秸秆覆盖 Straw mulching and hole sowing. 同列数值后不同小写字母表示不同处理间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among the treatments at 0.05 level.

均无显著差异。在 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的施氮条件下, 与农户减氮相比, 垄覆沟播、全膜穴播和秸秆覆盖在 2013~2014 平水年分别显著增加 13.5%、16.2% 和 13.5%。全膜穴播和秸秆覆盖 4 年平均籽粒需磷量分别比农户减氮显著增加 9.4% 和 12.5%。

分析百公斤籽粒需钾量可知, 在不同氮肥水平下, 农户减氮的籽粒需钾量相比农户模式在各年份均无显著差异。在 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的施氮条件下, 与农户减氮相比, 全膜穴播在 2014~2015 平水年和 2015~2016 欠水年分别显著增加 14.6% 和 21.8%; 精秆覆盖在 2013~2014 和 2014~2015 年两个平水年和 2015~2016 欠水年分别显著增加 34.9%、21.1% 和 16.2%。精秆覆盖 4 年平均籽粒需钾量相比农户减氮显著增加 19.5%。

2.3.2 小麦籽粒产量形成的养分生理效率 分析籽粒

产量形成的氮生理效率可知, 在不同氮肥水平下, 农户减氮的氮生理效率相比农户模式在各年份均无显著差异(表 6)。在 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的施氮条件下, 与农户减氮相比, 全膜穴播的氮生理效率仅在 2015~2016 欠水年显著增加 27.3%; 精秆覆盖在 2015~2016 欠水年显著增加 12.0%, 而在 2014~2015 平水年显著减少 16%。相比农户减氮 4 年平均氮生理效率, 各处理之间均无显著差异。

比较籽粒产量形成的磷生理效率发现, 在不同氮肥水平下, 农户减氮的磷生理效率相比农户模式在各年份均无显著差异。在 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的施氮条件下, 与农户减氮相比, 垄覆沟播、全膜穴播和精秆覆盖在 2013~2014 平水年分别显著减少 12.2%、12.9% 和 11.4%。精秆覆盖 4 年平均磷生理效率相比农户减氮显著减少 9.9%。

表 6 不同处理冬小麦籽粒产量形成氮磷钾的生理效率 (kg/kg)

Table 6 Physiological efficiencies for grain yield formation of N, P and K under different treatments

处理 Treatment	2012~2013	2013~2014	2014~2015	2015~2016	平均值 Average
N					
CK	33.5 a	37.4 a	40.9 a	63.4 a	43.8 a
N1	36.6 a	25.3 b	27.2 bc	39.5 e	32.1 b
N2	35.6 a	28.1 b	30.1 b	39.9 de	33.4 b
RMFS	34.6 a	25.0 b	28.3 bc	37.3 e	31.3 b
FMHS	34.3 a	25.4 b	28.0 bc	50.8 b	34.6 b
SMHS	34.1 a	24.4 b	25.3 c	44.7 cd	32.1 b
P					
CK	329.3 a	276.3 a	272.5 b	253.6 c	283.0 b
N1	381.3 a	245.2 bc	286.7 ab	344.4 a	314.4 a
N2	386.5 a	269.4 ab	283.0 ab	333.8 ab	318.2 a
RMFS	378.1 a	236.6 c	295.1 a	340.7 a	312.6 a
FMHS	349.6 a	234.7 c	280.2 ab	311.0 ab	293.9 ab
SMHS	339.3 a	238.6 c	270.7 ab	298.4 b	286.8 b
K					
CK	72.5 a	66.0 a	68.2 a	65.0 abc	67.9 a
N1	76.0 a	49.6 c	56.0 bc	70.0 a	62.9 ab
N2	73.3 a	62.1 ab	59.0 b	70.9 ab	66.3 a
RMFS	72.2 a	53.8 bc	55.6 bc	62.8 abc	61.1 ab
FMHS	74.4 a	52.0 bc	52.2 bc	58.5 c	59.3 b
SMHS	70.3 a	46.1 c	48.3 c	60.6 bc	56.3 b

注 (Note) : CK—不施氮肥 No N application; N1—施氮 $195 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 无覆盖 Applying N $195 \text{ kg}/\text{hm}^2$ without mulching; N2—施氮 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 无覆盖 Applying N $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ without mulching; FMHS—全膜穴播 Film mulching and hole sowing; RMFS—垄覆沟播 Ridge mulching furrow sowing; SMHS—精秆覆盖 Straw mulching and hole sowing. 2012~2013 年和 2015~2016 年度为欠水年, 2013~2015 年为平水年 Rainfall during 2012~2013 and 2015~2016 were less, and that during 2013~2015 was regular. 数据后不同小写字母表示不同处理间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different small letters indicate significant differences among the treatments at 0.05 level.

籽粒产量形成的钾生理效率分析表明, 在不同氮肥水平下, 农户减氮的钾生理效率相比农户模式在2013~2014平水年显著增加25.2%。在150 kg/hm²的施氮条件下, 与农户减氮相比, 全膜穴播仅在2015~2016欠水年显著减少17.5%; 稻秆覆盖在2013~2014和2014~2015两个平水年分别显著减少25.8%和18.1%。全膜穴播和稻秆覆盖4年平均钾生理效率相比农户减氮分别显著减少10.6%和15.1%。

3 讨论

3.1 不同覆盖措施对冬小麦籽粒产量和籽粒养分含量的影响

地膜覆盖能够减少土壤水分蒸发, 改善土壤水分环境, 促进小麦个体发育和群体构建, 提高作物体内干物质积累及干物质向籽粒的转运能力, 从而增加作物产量^[17~18]。Rehman等^[19]在小麦生育期覆盖地膜增产5%, Li等^[20]在春小麦生育期覆盖地膜增产23%。本试验垄覆沟播在2012~2013年显著增产15.7%, 全膜穴播显著增产6.8%, 与上述研究结果一致。另有研究表明, 休闲期降雨量与小麦产量呈正相关, 小麦一半以上的产量取决于播种前底墒的好坏^[21]。小麦产量出现年际变化, 可能与休闲期降水形成的底墒量有关^[22]。本试验在2012~2013年7~9月休闲期降雨量为301 mm, 2014~2015年休闲期降雨量为318 mm, 且全年降雨量较多, 稻秆覆盖处理产量显著增加, 与上述结果一致。因此, 地膜覆盖有利于提高冬小麦产量, 稻秆覆盖在降雨较多的年份增加冬小麦产量。

地表覆盖实现了旱地冬小麦增产, 但籽粒含氮量却明显下降, 这可能是由于地膜覆盖降低了小麦花期土壤硝态氮含量, 导致花后土壤供氮不足, 进而降低了籽粒含氮量^[23]。Ram等^[24]也表明稻秆覆盖使小麦籽粒含氮量降低是由于土壤矿质氮含量降低引起的。本研究稻秆覆盖的籽粒吸氮量在2015~2016年显著减少9.5%, 这可能与稻秆覆盖引起土壤氮生物固持有关^[25]。

关于地表覆盖对小麦籽粒磷钾含量影响的报道较少。本试验地表覆盖能改变籽粒含磷量和籽粒含钾量。小麦籽粒含钾量与土壤钾含量有直接关系^[26], 地表覆盖通过改变土壤养分供应能力及作物养分吸收能力对籽粒养分含量产生影响, 地表覆盖在不同降水年型间的籽粒养分效应差异, 主要是由于土壤水分和养分等环境因素改变作物生长发育进程而引起的。

3.2 不同覆盖措施对冬小麦籽粒产量形成的养分需求量和生理效率的影响

地表覆盖影响籽粒产量形成的需氮量和氮生理效率, 主要是由籽粒产量和地上部吸氮量不均衡增加造成的^[26]。土壤水分供应不足是旱地作物生产的主要限制因素。全膜穴播改善土壤水分状况, 增加籽粒产量, 同时增加稻秆吸氮量, 而籽粒产量形成的需氮量和氮生理效率未增加; 垄覆沟播的产量未增加, 而稻秆吸氮量增加, 从而提高了籽粒产量形成的需氮量、降低了籽粒产量形成的氮生理效率; 稻秆覆盖的产量、稻秆吸氮量增加, 而籽粒产量形成的需氮量也增加, 从而降低了籽粒产量形成的氮生理效率。

以往关于地表覆盖对籽粒产量形成的磷、钾需求量和磷、钾生理效率的报道较少, 大部分集中在施磷、钾肥以及区域间土壤肥力差异带来的作物磷、钾效应差异。串丽敏等^[27]总结2000~2011年全国小麦试验研究资料, 得出百公斤籽粒产量形成需磷量为0.6 kg, 高于本试验的0.3 kg; 籽粒产量形成的磷生理效率为189.5 kg/kg, 低于本试验的301.5 kg/kg。这主要是因为黄土高原的土壤是碱性土, 土壤有效磷活性低, 降低了小麦对磷的吸收效率, 从而减少了形成单位籽粒产量所需的磷素、增加了小麦吸收单位磷素形成籽粒产量的能力。Chuan等^[28]还总结出百公斤籽粒需钾量为1.9 kg, 高于本试验的1.66 kg; 籽粒钾生理效率为52.7 kg/kg, 低于本试验的62.3 kg/kg。

4 结论

农户减氮模式对冬小麦的产量、氮磷钾需求量以及生理效率无显著影响。垄覆沟播处理的产量未增加, 而稻秆吸氮量增加, 从而提高了籽粒产量形成的需氮量、降低了籽粒产量形成的氮生理效率。全膜穴播提高籽粒产量, 同时增加稻秆吸氮量, 但未增加籽粒产量形成的需氮量和氮生理效率。稻秆覆盖的产量增加, 同时增加稻秆吸氮量, 而籽粒产量形成的需氮量也增加, 从而降低了籽粒产量形成的氮生理效率。因此, 旱地小麦生产中为保证籽粒产量, 需增加地膜覆盖和稻秆覆盖的氮肥用量。

参 考 文 献:

- [1] Godfray H C J, Beddington J R, Crute I R, et al. Food security: The challenge of feeding 9 billion people[J]. Science, 2010, 327: 812~818.
- [2] Barrett C B. Measuring food insecurity[J]. Science, 2010, 327: 825~828.

- [3] Stewart B A, Liang W L. Strategies for increasing the capture, storage, and utilization of precipitation in semiarid regions[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(8): 1500–1510.
- [4] Li F M, Song Q H, Jjemba P K, Shi Y C. Dynamics of soil microbial biomass C and soil fertility in cropland mulched with plastic, film in a semiarid agro-ecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(11): 1893–1902.
- [5] Zhou L M, Li F M, Jin S L, Song Y J. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 41–47.
- [6] Chakraborty D, Nagarajan S, Aggarwal P, et al. Effect of mulching on soil and plant water status, and the growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) in a semi-arid environment[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(12): 1323–1334.
- [7] Gao Y J, Li Y, Zhang J C. Effects of mulch, N fertilizer, and plant density on wheat yield, wheat nitrogen uptake, and residual soil nitrate in a dry land area of China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 85(2): 109–121.
- [8] Yuan L, Zhang Z C, Cao X C, et al. Responses of rice production, milled rice quality and soil properties to various nitrogen inputs and rice straw incorporation under continuous plastic film mulching cultivation[J]. *Field Crops Research*, 2014, 155: 164–171.
- [9] Iqbal M M, Akhter J, Mohammad W, et al. Effect of tillage and fertilizer levels on wheat yield, nitrogen uptake and their correlation with carbon isotope discrimination under rain fed conditions in northwest Pakistan[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 80: 47–57.
- [10] 陈小莉, 李世清, 王瑞军, 等. 半干旱区施氮和灌溉条件下覆膜对春玉米产量及氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 652–658.
- Chen X L, Li S Q, Wang R J, et al. Effect of film mulching on yield and nitrogen balance of spring maize under different nitrogen and irrigation treatments in semi-arid region[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(4): 652–658.
- [11] Devkota M, Martius C, Lamers J P, et al. Combining permanent beds and residue retention with nitrogen fertilization improves crop yields and water productivity in irrigated arid lands under cotton wheat and maize[J]. *Field Crops Research*, 2013, 149: 105–114.
- [12] 黄婷苗, 郑险峰, 侯仰毅, 等. 稻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.
- Huang T M, Zheng X F, Hou Y Y, et al. Yield and N, P and K uptake and utilization of winter wheat affected and regulated by straw return to soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(4): 853–863.
- [13] Singh B, Bronson K F, Singh Y, et al. Nitrogen-15 balance as affected by rice straw management in a rice-wheat rotation in northwest India[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 59(3): 227–237.
- [14] 郭媛, 高志强, 孙敏, 等. 休闲期覆膜与施氮量对旱地小麦水氮利用效率和籽粒产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(10): 1398–1405.
- Guo Y, Gao Z Q, Sun M, et al. Effects of different management patterns on uptake, distribution and fate of nitrogen in wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(10): 1398–1405.
- [15] 沈新磊, 黄思光, 王俊, 等. 半干旱农田生态系统地膜覆盖模式和施氮对小麦产量和氮效率的效应[J]. 西北农林科技大学学报, 2003, 31(1): 1–12.
- Shen X L, Huang S G, Wang J, et al. Effects of plastic film mulching models and nitrogen fertilizer on wheat yield and nitrogen efficiency[J]. *Journal of Northwest Agriculture and Forestry University*, 2003, 31(1): 1–12.
- [16] Sun H Y, Shen Y J, Yu Q, et al. Effect of precipitation change on water, balance and WUE of the winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1139–1145.
- [17] Kasirajan S, Ngouajio M. Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, 32(2): 501–529.
- [18] Dong B D, Liu M Y, Jiang J W, et al. Growth, grain yield, and water use efficiency of rain-fed spring hybrid millet (*Setaria italica*) in plastic-mulched and unmulched fields[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 143: 93–101.
- [19] Rehman S, Khalil S K, Rehman A, et al. Micro-watershed enhances rain water use efficiency, phenology and productivity of wheat under rain fed condition[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(1): 82–87.
- [20] Li F M, Guo A H, Wei H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat[J]. *Field Crops Research*, 1999, 63(1): 79–86.
- [21] 党廷辉, 高长青. 渭北旱塬影响小麦产量的关键降水因子分析[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 9–11, 36.
- Dang T H, Gao C Q. Study on key water factors of affecting wheat yield in Weibei dry highland[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(1): 9–11, 36.
- [22] Novoa R, Loomis R S. Nitrogen and plant production[J]. *Plant and Soil*, 1981, 58: 177–204.
- [23] 李强, 王朝辉, 李富翠, 等. 氮肥管理与地膜覆盖对旱地冬小麦产量和氮素利用效率的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(1): 93–100.
- LI Q, Wang Z H, Li F C, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on yield and nitrogen use efficiency in winter wheat growing on dry land with plastic film mulching[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(1): 93–100.
- [24] Ram H, Dadhwal V, Vashist K K, Kaur H. Grain yield and water use efficiency of wheat (*Triticum aestivum* L.) in relation to irrigation levels and rice straw mulching in North West India[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 128: 92–101.
- [25] Shindo H, Nishio T. Immobilization and remineralization of N following addition of wheat straw into soil: Determination of gross N transformation rates by ¹⁵N-ammonium isotope dilution technique[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(3): 425–432.
- [26] Yang N, Wang Z H, Gao Y J, et al. Effects of planting soybean in summer fallow on wheat grain yield, total N and Zn in grain and available N and Zn in soil on the Loess Plateau of China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 58: 63–72.
- [27] 串丽敏. 基于产量反应和农学效率的小麦推荐施肥方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2013.
- Chuan L M. Methodology of fertilizer recommendation based on yield response and agronomic efficiency for wheat [D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [28] Chuan L M, He P, Jin J Y, et al. Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China[J]. *Field Crops Research*, 2013, 146: 96–104.