植物营养与肥料学报 2012,18(2):291 -299
Plant Nutrition and Fertilizer Science

长期地表覆盖及施氮对冬小麦产量及土壤肥力的影响

王淑娟,田霄鸿*,李 硕,张耀华
(西北农林科技大学资源环境学院,农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西杨凌 712100)

摘要: 通过在陕西关中平原地区连续7年的田间定位试验,分析比较了3种地表覆盖模式(常规、覆草、覆膜)下不同施氮水平(N 0、120、240 kg/hm^2)对冬小麦产量及土壤肥力的影响,旨在为半湿润易旱区旱作农业选择合理的栽培组合提供依据。结果表明,2002～2009年覆草处理小麦产量平均减产1.46%,覆膜增产7.04%,施用氮肥平均增产42.72%,而N240与N120处理间无显著差异。试验进行第7季后对土壤肥力有如下影响:覆草及覆膜处理下土壤活性有机碳含量较常规分别增加37.57%、21.39%;覆草亦显著提高土壤有机碳、全氮、速效钾含量,较常规分别增加6.84%、4.40%、12.68%,而覆膜作用不显著。施氮量主要影响土壤活性有机碳、矿质氮、速效磷及pH值,施氮较不施氮依次增加6.03%、40.18%、-23.55%、-0.05个pH单位,与N120处理相比,N240处理对土壤矿质氮及pH值影响不显著。综上,在研究区一年一作条件下,覆草或覆膜处理增产潜力有限,但覆草配施适量氮肥模式具有明显增加土壤有机碳和速效钾含量的效果,亦对提高石灰性土壤养分有效性具有重要作用。

关键词: 地表覆盖模式;施氮水平;小麦产量;土壤肥力指标
中图分类号: S512.1;S158.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)02-0291-09

Effects of long-term surface mulching and N addition on winter wheat yield and soil properties

WANG Shu-juan, TIAN Xiao-hong*, LI Shuo, ZHANG Yao-hua
(*College of Resources and Environment, Northwest A&F University/Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: To determine reasonable cultivation mode for dry farming practice in the semi-humid prone to drought region, the effects of surface mulching and N addition on winter wheat yield and soil nutrients regimes were compared. The experiment was conducted during the seven consecutive years of 2002-2009 in Guanzhong Plain of Shaanxi province. The nine treatments consisted of three levels of mulching, namely, no mulching (NM), wheat straw mulching (WSM), plastic film mulching (PFM), and three nitrogen levels (N 0, 120 and 240 kg/ha). Soil samples were collected after wheat harvest in 2009 of a winter wheat-summer fallow system. In addition, wheat yields were also considered in the growing seasons of 2002-2009. The results showed that the yield was averagely decreased by 1.46% in the WSM treatment, and increased by 7.04% in the PFM treatment compared to the NM treatment of consecutive seven years. Moreover, the yield was averagely increased by 42.72% in the two nitrogen amended treatments compared to the no nitrogen addition treatment during 2002-2009, however, no significant differences between N application of 120 and 240 kg/ha treatments were found. Comparing with NM treatment, soil labile organic C content at the surface layer was significantly increased by 37.57% and 21.39% in the WSM and PFM treatments, respectively. In contrast with PFM, a significant increase of 6.84%, 4.40% and 12.68% in soil

收稿日期: 2011-08-15　　**接受日期:** 2011-11-22
基金项目: 国家自然科学基金项目(40971179, 31071863);"十二五"科技支撑计划(2012BAD14B11);西北农林科技大学创新团队项目(2010)资助。
作者简介: 王淑娟(1986—),女,山西临汾人,硕士研究生,主要从事养分资源管理方面的研究。E-mail: wangshujuan922@163.com
*通讯作者 Tel: 029-87082069, E-mail: txhong@hotmail.com

organic C, total N and available K was observed in WSM treatment, respectively. Soil labile organic C and mineral N were averagely increased by 6.03%, 40.18%, and available P and pH value were decreased by 23.55% and 0.05 pH unit in the two N amended treatments compared to the N0 treatment. In other words, these four soil parameters were significantly sensitive to different N rates. But there were no significant differences of mineral N and pH value between N120 and N240. In conclusion, there are no advantages on yield of WSM and PFM treatments in this experiment. Meanwhile, the planting mode of WSM combined with nitrogen application of 120 kg/ha can significantly increase soil organic C and available K content, and it is also a better way to improve the availability of soil nutrients in calcareous soil.

Key words: mulching mode; N rate; wheat yield; soil characteristic

水分和养分胁迫是旱作农业亟待解决的两大问题[1],作物生长期间采用合理地表覆盖模式和施肥措施以求保墒增产、提高土壤肥力成为研究热点。覆盖栽培(秸秆覆盖和地膜覆盖)可以有效减少棵间土壤水分蒸发,增加贮水量,降低水分亏缺程度,提高小麦产量[2-3];土壤有机质、全量养分、速效养分亦对不同土壤管理措施产生不同响应。氮是作物生长必需的首要元素,也是土壤最为缺乏的营养元素[4]。在缺氮土壤上,长期施用氮肥,不仅实现了小麦高产稳产,也培肥了地力;但氮肥大量施用,导致氮素以氨挥发和反硝化等形式的损失量增加,在土壤中残留累积愈加明显[5],且降低了投入碳的积累,不利于土壤有机质提升[6],不仅浪费资源,而且对周边环境及人体健康产生负面影响[7],所以选择行之有效的覆盖模式及施氮量对解决旱地水肥胁迫问题具有现实指导意义。而目前对小麦栽培施肥措施的研究多集中在两个方面,一是水氮效应问题[1-2, 5, 8-10],二是探讨秸秆覆盖等保护性耕作措施对土壤肥力的影响[11-13],但对长期不同地表覆盖模式及施氮量对冬小麦产量及土壤肥力影响差异的研究相对较少。因此,本试验以当地农民常规栽培模式为对照,通过对9个处理下冬小麦产量、土壤有机碳等指标的比较研究,旨在阐明秸秆、地膜两种覆盖模式及适量施氮、高量施氮对小麦增产、土壤培肥效应的差异,筛选符合当地粮食生产的覆盖施氮模式,为进一步实现优质、高产、高效、提高土地生产力、可持续发展的旱地节水农业提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于陕西杨凌西北农林科技大学农作一站,该站位于黄土高原南部旱作区,处于渭河三级阶地。属温带大陆性气候,海拔524.7 m,年均气温约13℃,年均降水量632 mm,主要分布在7、8、9三个月,占全年降水量的60%左右,冬春季易发生旱情,年均水面蒸发量990 mm,属半湿润易旱地区。土壤类型为褐土类,塿土亚类,红油土属,黄土母质,系统分类为土垫旱耕人为土,且为石灰性土壤。2002~2009年各季小麦生长期间降水量(每年10月小麦播种到次年6月小麦收获期间)见图1。在2002年试验开始前耕层土壤基本理化性状为:有机质含量13.79 g/kg,速效磷4.93 mg/kg,硝态氮5.43 mg/kg,铵态氮2.41 mg/kg,碳酸钙65.1 g/kg。

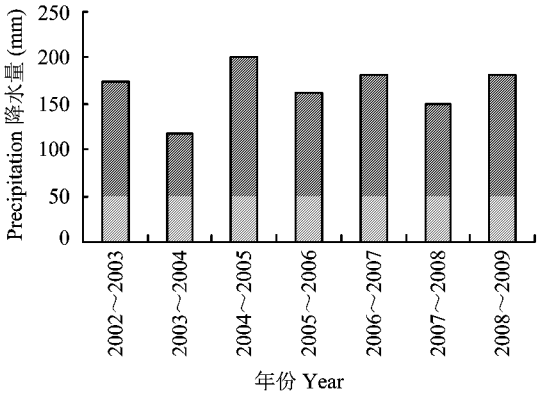

图1 2002~2009各季小麦生长期间降水量

Fig. 1 Precipitation during the 2002-2009 wheat growing seasons

1.2 试验设计

本试验为长期定位试验,始于2002年10月,种植制度为冬小麦—夏季休闲一年一作制。在田间采用完全随机区组设计,冬小麦生长季设置不同地表覆盖模式及施氮量两个试验因素,其中地表覆盖模式设3个水平,即常规(裸地无覆盖NM,为当地农户常用模式);覆草(麦秸覆盖WSM,小麦出苗后全区覆盖,覆草量为4500 kg/hm^2);覆膜(垄上覆膜/沟内播种PFM,小麦出苗后垄上覆膜,垄宽:沟宽 = 40 cm:50 cm)。在每区均施P_2O_5 100 kg/hm^{2}基础上,施氮量设3个水平,即N 0、120、240 kg/hm^2,共

9 个处理,4 个区组,小区面积 6 m×9.9 m=59.4 m^2。供试小麦品种为小偃22,播种量为 90 kg/hm^2。氮肥用普通尿素(N ≥ 46%),磷肥用过磷酸钙(P_2O_5≥ 16%),所有肥料均于播前撒施后旋耕与土壤混匀,全生育期无灌溉,其他田间管理与当地管理措施一致。

试验小区于每年 6 月小麦收获后低留茬休闲,7 月初进行土壤深翻旋耕,10 月播种下一季冬小麦,其他时间不进行人工除草,杂草自然生长演替。

1.3　样品采集及测定

测产及考种　收获各小区总行数的三分之一行数进行测产,同时每小区随机选取 2 个 1 m^2 面积统计小麦有效穗数,采集 2 组各 40 个麦穗考察千粒重、穗粒数等指标。

土壤样品采集与测定　于 2009 年 10 月 14 日采集休闲期结束后 0—20 cm 耕层土壤样品,每小区分 7 点采样,混合均匀,新鲜土壤样品用于测定硝态氮和铵态氮含量(KCl 浸提,AA3 型连续流动分析仪测定);风干土壤样品分别过 1 mm、0.25 mm 筛用于测定土壤有机碳($K_2Cr_2O_7$ 外加热法)、活性有机碳($KMnO_4$ 氧化法)、全氮(半微量开氏法)、速效磷(Olsen 法)、速效钾(NH_4OAc 浸提,火焰光度法测定)、pH 值(水∶土 = 2.5∶1,PHS-3C 型 pH 计测定)等指标[14-15]。

1.4　数据处理

运用 Microsoft Excel 2007 软件对数据进行预处理及作图,用 DPS v7.05 软件进行完全随机区组设计的方差分析及 $LSD_{0.05}$差异显著性检验。

2　结果与分析

2.1　小麦产量

2.1.1 2002～2008 各生长季(前 6 季)小麦产量　地表覆盖模式对小麦产量影响各不相同(表 1)。2002 ～ 2008 年覆草处理小麦产量平均减产 2.43%,覆膜增产 8.80%。除第 1 季外,覆草处理产量均与常规无显著差异。2003 ～2004 季小麦生长期间降水量只有 117.1 mm(图 1),覆草较常规增产 6.92%,其他年份增产幅度更低,甚至减产一成左右,说明目前覆草处理在本试验一年一作条件下增产潜力有限。覆膜处理 6 季小麦产量均保持在较高水平,前 4 季较常规和覆草分别增产 16.95%、20.03%,但从第 5 季开始与常规和覆草分别相比均有减产趋势,所以有必要继续研究长期覆草、覆膜对小麦产量的影响。

2002 ～ 2008 年施用氮肥小麦平均增产 38.89%(表2)。与 N0 相比,前 4 季 N120、N240 分别平均增产 17.62%、15.05%;从 2006 ～ 2007 季开始,后 2 季氮肥增产幅度明显增大,与 N0 相比,N120、N240 处理分别增产 80.88%、87.14%,说明随着种植年限的延长,不施氮处理土壤氮素肥力愈低,与施氮处理小麦产量差值愈大。

表 1　长期地表覆盖对小麦产量的影响(2002 ～ 2008 生长季)

Table 1　Effect of long-term surface mulching on wheat yield in the growing seasons of 2002-2008

覆盖模式 Mulching mode	2002～2003		2003～2004		2004～2005	
	产量 Yield (kg/hm^2)	增产 Increase (%)	产量 Yield (kg/hm^2)	增产 Increase (%)	产量 Yield (kg/hm^2)	增产 Increase (%)
常规 NM	5127 b		4870 b		5555 a	
覆草 WSM	4609 c	-10.10	5207 b	6.92	5290 a	-4.77
覆膜 PFM	5954 a	16.13	5766 a	18.40	5642 a	1.57

覆盖模式 Mulching mode	2005～2006		2006～2007		2007～2008	
	产量 Yield (kg/hm^2)	增产 Increase (%)	产量 Yield (kg/hm^2)	增产 Increase (%)	产量 Yield (kg/hm^2)	增产 Increase (%)
常规 NM	3479 b		4792 a		3960 a	
覆草 WSM	3430 b	-1.41	4478 a	-6.55	4013 a	1.34
覆膜 PFM	4581 a	31.68	4432 a	-7.51	3665 b	-7.45

注(Note):NM—No mulching; WSM—Wheat straw mulching; PFM—Plastic film mulching. 不同年限各地表覆盖模式处理间多重比较均在 5% 显著水平下进行 The multiple comparisons among three mulching treatments are conducted at α = 0.05 in different years.

表2 长期施氮对小麦产量的影响(2002～2008生长季)

Table 2 Effect of long-term N application on wheat yield in the growing seasons of 2002–2008

施氮量 N rate (kg/hm²)	2002～2003		2003～2004		2004～2005	
	产量 Yield (kg/hm²)	增产 Increase (%)	产量 Yield (kg/hm²)	增产 Increase (%)	产量 Yield (kg/hm²)	增产 Increase (%)
N0	4582 b		4688 b		4834 b	
N120	5594 a	22.09	5521 a	17.77	5853 a	21.08
N240	5514 a	20.34	5634 a	20.18	5800 a	19.98
施氮量 N rate (kg/hm²)	**2005～2006**		**2006～2007**		**2007～2008**	
	产量 Yield (kg/hm²)	增产 Increase (%)	产量 Yield (kg/hm²)	增产 Increase (%)	产量 Yield (kg/hm²)	增产 Increase (%)
N0	3716 b		3286 b		2242 c	
N120	4070 a	9.53	5224 a	58.98	4546 b	102.77
N240	3705 b	-0.30	5192 a	58.00	4849 a	116.28

注(Note):不同年限各施氮量处理间多重比较均在5%显著水平下进行 The multiple comparisons among three N application treatments are conducted at $\alpha = 0.05$ in different years.

2.1.2 2008～2009生长季(第7季)小麦产量 不施氮条件下,不同地表覆盖模式处理之间子粒平均产量差异达显著水平,为覆草N0(3214 kg/hm²)>覆膜N0(2772 kg/hm²)>常规N0(2381 kg/hm²);施氮条件下,子粒平均产量差异不大(图2)。相同地表覆盖模式下,子粒平均产量施氮处理大于不施氮处理,但N120、N240处理之间差异不显著,说明施氮量较高(N240)对小麦增产影响不大,且施氮量较高加地表覆盖处理子粒产量低于未覆盖处理,即常规N240>覆草N240>覆膜N240处理。

不同地表覆盖模式及施氮水平均显著影响小麦收获指数(表3),施氮较不施氮提高13.74%;与覆膜处理相比,覆草显著降低收获指数,而3种地表覆盖模式对子粒产量影响未达到显著水平,即覆草显著增加了小麦生物学产量,较常规和覆膜分别增加10.87%、14.66%。

对影响产量构成三要素的因子进行分析发现(表3),地表覆盖模式主要影响小麦穗粒数,为覆膜>覆草>常规处理,其中覆膜、覆草处理较常规分别增加17.95%、12.50%,覆膜较覆草增加8.33%;与常规及覆草处理相比,覆膜穗数显著降低;对千粒重的影响差异不显著。施氮较不施氮,千粒重显著降低,穗粒数、穗数及小麦产量均显著增加,说明穗粒数、穗数对小麦产量贡献较千粒重大;与N120处理相比,N240处理对三要素的影响较小。9个处理之间千粒重、穗粒数及穗数的变异系数依次为7.21%、14.41%、21.73%,说明地表覆盖模式及施氮量共同作用主要影响小麦穗粒数、穗数,进而影响小麦产量。

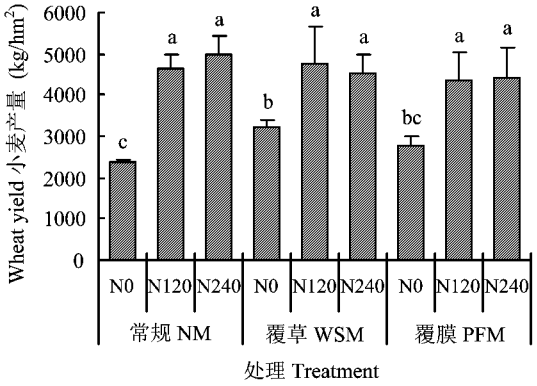

图2 不同处理对小麦产量的影响(2008～2009生长季)

Fig. 2 Effect of different treatments on wheat yield in the growing season of 2008–2009

[注(Note):NM—常规 No mulching; WSM—覆草 Wheat straw mulching; PFM—覆膜 Plastic film mulching. 柱上不同字母表示各处理间差异达5%显著水平 Different letters above the bars denote significant differences among 9 treatments at $\alpha = 0.05$.]

2.2 连续种植7季后地表覆盖及施氮对土壤肥力指标的影响

从表4可以看出,经过7年种植,土壤有机碳、全氮、速效钾含量的变化受地表覆盖模式影响显著,矿质氮、速效磷及pH值主要受施氮量影响,而土壤活性有机碳同时受地表覆盖模式、施氮量及二

表 3　不同处理对小麦产量构成要素及收获指数的影响(2008 ～ 2009 生长季)

Table 3　Effect of different treatments on yield components and harvest index of wheat in the growing season of 2008 – 2009

施氮量 N rate (kg/hm^2)	千粒重 1000 grain weight (g)				穗粒数 Grains per spike(No./spike)			
	常规 NM	覆草 WSM	覆膜 PFM	均值 Mean	常规 NM	覆草 WSM	覆膜 PFM	均值 Mean
N0	32.07 bc	33.03 ab	36.34 a	33.81 a	28.3 e	29.5 de	33.0 cd	30.3 c
N120	33.28 ab	29.80 bc	32.79 ab	31.96 ab	31.5 de	37.8 b	39.7 ab	36.4 b
N240	30.28 bc	32.35 abc	28.44 c	30.36 b	37.0 bc	40.1 ab	42.9 a	40.0 a
均值 Mean	31.88 a	31.73 a	32.52 a		32.3 c	35.8 b	38.5 a	

施氮量 N rate (kg/hm^2)	穗数 Spike density ($\times 10^4/hm^2$)				收获指数 Harvest index (%)			
	常规 NM	覆草 WSM	覆膜 PFM	均值 Mean	常规 NM	覆草 WSM	覆膜 PFM	均值 Mean
N0	358 c	335 cd	292 d	328 b	34.0 de	32.9 e	35.7 cde	34.2 b
N120	529 a	541 a	505 ab	525 a	38.9 abc	37.7 bc	37.5 bcd	38.0 a
N240	544 a	510 a	446 b	500 a	40.6 ab	37.5 bcd	41.4 a	39.8 a
均值 Mean	477 a	462 a	414 b		37.8 ab	36.0 b	38.2 a	

注(Note): NM—常规 No mulching; WSM—覆草 Wheat straw mulching; PFM—覆膜 Plastic film mulching. 9 个处理间、不同地表覆盖模式间(列均值)及施氮量间(行均值)多重比较均在 5% 显著水平下进行 The multiple comparisons among 9 treatments and various levels (mean) of mulching and N are conducted at $\alpha = 0.05$.

表 4　不同处理对土壤肥力指标影响的方差分析(*P* 值)

Table 4　Significant differences (*P* values) for two-way ANOVA for the effect of different treatments on soil fertility parameters

肥力指标 Fertility parameter	地表覆盖模式 Mulching mode	施氮量 N rate	地表覆盖模式 × 施氮量 Mulching mode × N rate
有机碳 Organic C	0.0035	0.2808	0.1440
活性有机碳 Labile organic C	<0.0001	0.0244	0.0428
全氮 Total N	0.0363	0.4185	0.5329
矿质氮 Mineral N	0.2722	0.0030	0.2025
速效磷 Available P	0.4913	0.0011	0.8377
速效钾 Available K	0.0379	0.5008	0.9854
pH	0.1340	0.0260	0.2426

者交互作用的影响,说明该指标对不同土壤管理措施变化反应敏感。

2.2.1 地表覆盖及施氮对土壤碳、氮的影响　土壤有机质是土壤中各种营养元素的重要来源,也是微生物必不可少的碳源。地表覆盖模式显著影响土壤有机碳含量($P = 0.0035$),而施氮量对其影响较小($P = 0.2808$),两者之间交互效应未达显著水平($P = 0.1440$)(表 4)。经过 7 年种植,覆草处理显著增加了土壤有机碳含量,分别较常规、覆膜处理增加 6.84%、7.85%;而覆膜与常规处理差异不显著,甚至呈降低趋势(表 5)。施氮有增加土壤有机碳含量的趋势,表现为 N120 > N240 > N0,主要是施氮可促进小麦地上部和根系的生长发育,增加小麦根系及地上部残茬的还田量,同时可降低秸秆根茬 C/N,加快其分解,但施氮量较高时对增加土壤有机碳含量的作用不明显。

表5 不同处理对土壤碳、氮、速效磷和速效钾的影响

Table 5 Effect of different treatments on soil C, N, available P and available K

施氮量 N rate (kg/hm²)	有机碳 Organic C (g/kg)				活性有机碳 Labile organic C (g/kg)			
	常规 NM	覆草 WSM	覆膜 PFM	均值 Mean	常规 NM	覆草 WSM	覆膜 PFM	均值 Mean
N0	8.86 bc	9.50 ab	8.76 c	9.04 a	1.47 d	2.40 a	2.11 abc	1.99 b
N120	9.49 abc	9.44 abc	9.19 bc	9.37 a	1.63 d	2.38 ab	1.98 c	2.00 b
N240	8.84 bc	10.11 a	8.80 bc	9.25 a	2.10 bc	2.37 ab	2.20 abc	2.22 a
均值 Mean	9.06 b	9.68 a	8.92 b		1.73 c	2.38 a	2.10 b	

施氮量 N rate (kg/hm²)	全氮 Total N (g/kg)				矿质氮 Mineral N (mg/kg)			
	常规 NM	覆草 WSM	覆膜 PFM	均值 Mean	常规 NM	覆草 WSM	覆膜 PFM	均值 Mean
N0	0.89 b	0.92 b	0.89 b	0.90 a	9.97 d	10.55 cd	12.01 bcd	10.84 b
N120	0.93 ab	0.93 ab	0.89 b	0.92 a	16.55 ab	10.02 d	15.11 abcd	13.89 a
N240	0.90 b	0.99 a	0.90 b	0.93 a	15.36 abc	16.87 ab	17.25 a	16.50 a
均值 Mean	0.91 b	0.95 a	0.89 b		13.96 a	12.48 a	14.79 a	

施氮量 N rate (kg/hm²)	速效磷 Available P (mg/kg)				速效钾 Available K (mg/kg)			
	常规 NM	覆草 WSM	覆膜 PFM	均值 Mean	常规 NM	覆草 WSM	覆膜 PFM	均值 Mean
N0	12.16 ab	14.04 a	12.20 ab	12.80 a	138.8 cd	156.8 a	147.2 abc	147.6 a
N120	10.71 bcd	11.08 bc	9.89 cd	10.56 b	142.1 abcd	155.1 ab	145.6 abcd	147.6 a
N240	8.85 d	9.01 cd	9.18 cd	9.01 c	130.7 d	152.1 abc	140.6 bcd	141.1 a
均值 Mean	10.57 a	11.38 a	10.42 a		137.2 b	154.6 a	144.5 b	

注(Note): NM—常规 No mulching; WSM—覆草 Wheat straw mulching; PFM—覆膜 Plastic film mulching. 9个处理间、不同地表覆盖模式间(列均值)及施氮量间(行均值)多重比较均在5%显著水平下进行 The multiple comparisons among 9 treatments and various levels (mean) of mulching and N are conducted at $\alpha = 0.05$.

土壤活性有机碳是指在一定的时空条件下,受植物、微生物影响强烈,具有一定溶解性,在土壤中移动较快、不稳定、易氧化、易分解、易矿化,其形态、空间位置对植物、微生物来说活性比较高的那一部分土壤碳素[16],与土壤有效养分、土壤的物理性状、耕作措施等具有更密切的关系,是评价土壤质量及土壤管理的一个重要指标[17-18]。与常规处理相比,覆草、覆膜显著增加了土壤活性有机碳含量,其中覆草、覆膜较常规处理分别增加37.57%、21.39%,覆草较覆膜增加13.33%。常规处理下,施氮较不施氮活性有机碳含量增加26.87%,而施氮量对覆草、覆膜处理下的活性有机碳含量影响不明显。另外,覆草、覆膜处理均不同程度地提高了活性有机碳占总有机碳的比例,覆草处理提高幅度更大,即覆草(24.67%) > 覆膜(23.53%) > 常规(19.18%),而活性有机碳所占比例越大,有机碳质量越高[19],说明覆草条件下土壤碳素活性更大,易转化。

土壤有机质一般含氮5%左右,且无机形态的氮仅占全氮的1%~5%[14]。土壤全氮含量变化规律与有机碳类似,为覆草 > 常规 > 覆膜处理,覆草较覆膜显著增加全氮含量,增幅为6.74%。表层土壤矿质氮含量($NO_3^- - N + NH_4^+ - N$)受不同地表覆盖模式处理影响较小,施氮显著提高了矿质氮含量,表现为N240 > N120 > N0。

2.2.2 地表覆盖及施氮对土壤速效磷、速效钾的影响 小麦生长季磷肥均作为基肥施入,且施入量相同,而覆草处理有增加土壤速效磷的趋势,较常规增加7.66%,说明长期覆草对土壤速效磷含量逐渐产生影响(表5)。麦秸本身含磷量仅约为

0.080%[20],每年覆盖 4500 kg/hm² 麦秸,连续 7 年相当于额外向土壤投入了 25.2 kg/hm² 的磷,对土壤磷的累计贡献有限,但覆草显著提高土壤有机质含量(表 5),土壤有机质具有与难溶性磷反应的特性,能提高土壤磷的有效性,使该处理下土壤速效磷含量较其他处理有增加趋势。施氮较不施氮土壤速效磷含量显著降低,其中,常规处理施氮较不施氮平均降低 19.57%、覆草平均降低 28.46%、覆膜平均降低 21.84%,因为磷在土壤剖面的移动性较小,不易产生淋洗和挥发,土壤磷移出量主要取决于植株携出量,即施氮较不施氮在增产的同时亦会携出较多土壤磷,说明氮磷肥配施有助于提高小麦吸磷量,使得土壤速效磷含量降低。

覆草处理能显著提高土壤速效钾含量,较常规及覆膜处理分别增加 12.68%、6.99%,与麦秸本身含有一定量水溶性钾有关。每年进行覆草,将作物带走的大部分土壤钾素又归还给土壤钾库,即麦秸本身含钾量约为 1.05%[20],每年覆盖 4500 kg/hm² 麦秸,连续 7 年相当于额外向土壤投入了 330.75 kg/hm² 的钾,但随施氮量的增加,速效钾含量有降低趋势,说明施用氮肥可以促进植物对钾的吸收(表 5)。

2.2.3 地表覆盖及施氮对土壤 pH 值的影响　土壤 pH 值和土壤有机质存在一定的负相关,覆草处理与常规相比,表层土壤 pH 值偏低,约下降 0.03 个单位。长期施用氮肥土壤 pH 值偏低,与不施氮肥相比,约下降 0.05 个单位,且差异显著(表 6)。

表 6　不同处理对 pH 值的影响

Table 6　Effect of different treatments on soil pH

施氮量 N rate (kg/hm²)	常规 NM	覆草 WSM	覆膜 PFM	均值 Mean
N0	8.24 a	8.20 ab	8.19 abc	8.21 a
N120	8.17 abc	8.12 c	8.20 ab	8.16 b
N240	8.14 bc	8.14 bc	8.19 abc	8.16 b
均值 Mean	8.18 a	8.15 a	8.19 a	

注(Note):NM—常规 No mulching; WSM—覆草 Wheat straw mulching; PFM—覆膜 Plastic film mulching. 9 个处理间、不同地表覆盖模式间(列均值)及施氮量间(行均值)多重比较均在 5% 显著水平下进行 The multiple comparisons among 9 treatments and various levels (mean) of mulching and N are conducted at $\alpha = 0.05$.

3　讨论

3.1　地表覆盖及施氮对小麦产量的影响

2008 ~ 2009 季小麦不施氮肥时,覆草处理较常规显著增产 34.99%,覆膜与常规差异不显著。施用氮肥时,三种地表覆盖模式子粒产量差异不显著,因为年均降水量 632 mm 的杨凌光热条件可以满足冬小麦—夏玉米一年两作,但降水稍有不足;若冬小麦—夏休闲一年一作,其水分会有盈余,对当季小麦生长的限制会较氮肥用量小,且 2008 ~ 2009 季在小麦生育期降水 180.8 mm,属于常态年,土壤休闲蓄水作用及覆草、覆膜的保墒增产效果均不显著,且施氮对常规处理下小麦增产幅度比覆草、覆膜大。另外,小麦生育期间均不进行人工灌溉,小麦子粒产量为覆草 N120 > 常规 N120,而覆草 N240 < 常规 N240,说明覆草处理可以提高小麦产量[2],但其增产有一定水氮条件限制,施氮量较高时,覆草已表现出小麦减产趋势[1],但未达到显著水平。同时,覆草显著增加了地上部非子粒部分的生物量,即收获指数最小,这也是该处理小麦产量不高的原因之一。

同样是 2008 ~ 2009 季,位于渭北旱塬长武试验的小麦生育期(2008/9/20 ~ 2009/6/21)不仅较杨凌的长,生育期降水(242.1 mm)亦较杨凌的多,但降水分布规律大致相同,在推荐施肥条件下(N 120 kg/hm²、P_2O_5 90 kg/hm²)覆草(NP + S)、覆膜(NP + PF)与不覆盖处理(NP)相比,肥力较低的梯田显著增产,肥力较高的塬面有增产趋势,但未达到显著水平[9],而杨凌试验中覆草、覆膜处理只在长期不施氮肥情况下显著增产,究其原因主要有两点,长武和杨凌虽然年均降水量差异较小,但长武年总干燥度(1.72)大于杨凌的(1.57),即长武小麦更易受到干旱胁迫,采取适当保墒增产措施效果易体现;另外,除了气候、地形等自然条件外,农田肥力高低也会影响地表覆盖模式效果。

2002 ~ 2009 年 7 季小麦生育期间除 2003 ~ 2004 季降水为 117.1 mm 外,其余年份均为 150 ~ 200 mm,雨水相对充沛,若只考虑施氮量对小麦产量的影响,2008 ~ 2009 季小麦产量 N240 > N120 > N0,与 N0 相比,N120、N240 处理分别增产 64.58%、66.76%,与连续 7 年 N0 处理小麦氮素携出量远大于氮素投入量有关,此种土壤氮素营养盈亏不平衡状态表现在产量上即为施用氮肥增产幅度逐渐变大(表 2),从第 5 季开始施氮较不施氮增产

50%以上。

3.2 地表覆盖及施氮对土壤肥力的影响

覆草处理显著提高了土壤有机碳含量,而覆膜此作用不明显,甚至有降低趋势[21-22]。麦秸有机碳含量约占39.9%[20],每667m^{2}耕层土壤(0—20 cm)重量以1.5×10^5 kg计,覆草处理每年秸秆还田量为4500 kg/hm^2,经过7年土壤有机碳含量理论上应较常规处理增加5.59 g/kg,但实际增加只有0.62 g/kg,主要原因为秸秆在腐解过程中,CO_2-C释放量约占碳释放总量的50%[23],即约有一半的碳以无机态形式损失,且土壤有机质含量是有机质矿化分解与合成平衡的结果,另外,小麦田每年夏秋季均以低留茬方式休闲,土壤温度高,水分状况良好,微生物活性强,有机残体矿化作用强烈,虽然经过7季种植,但常规处理土壤有机碳含量有增加趋势,这也是常规N0处理有机碳含量较2002年试验前含量高的一个重要原因。

本试验三个施氮水平对有机碳和全氮影响均不显著,对矿质氮影响显著,因为施入的尿素在脲酶作用下水解生成无机氮化物,且随着施氮量增加,小麦吸氮量和土壤残留硝态氮含量均显著提高[5],而关中平原土壤夏季休闲会增加硝态氮淋失和反硝化[24],使得通过施用化学氮肥来提高土壤有机碳和全氮含量进程缓慢。覆草处理不同程度增加了表层土壤速效磷、速效钾含量[12, 21],而秸秆腐解养分释放速率为K>P,释放量亦为K>P,在淹水条件下培养12 d钾释放率即可达98%[25],所以在长期不施用任何钾肥条件下,覆草对补充提高土壤钾素含量占绝对优势,而覆膜此作用不明显。

经过7年耕作,各地表覆盖模式处理对土壤pH值影响均不显著,但与常规相比,覆草处理土壤pH值偏低[13]。Guo等[26]通过分析上世纪80年代以来我国主要农田土壤显著酸化的现象指出,长期过量施用氮肥是导致农田土壤酸化的最主要原因,本研究中N120、N240处理与N0相比,均显著降低了土壤pH值,而N120与N240之间差异不显著,即长期高量施氮或适量施氮均有可能降低土壤pH值,但这种现象只在覆草处理下达到显著差异性水平,而覆膜处理下几乎无变化,说明长期覆草配施适量氮肥就可有效降低土壤pH值,这对研究如何提高石灰性土壤养分有效性具有重要意义,而覆膜方式无此作用。

综合小麦产量及土壤肥力指标,覆草处理主要影响土壤碳素、钾素含量,覆膜处理此作用与常规处理无显著差异,但本试验覆草或覆膜处理增产潜力有限,需要继续探索适于该区域推广的秸秆还田方式;试验中覆膜处理是在小麦出苗后再覆膜,易导致实际所覆地膜面积减少,所以有待于尝试通过小麦播种前覆膜、扩大覆膜面积等途径解决此问题。

参考文献:

[1] 高亚军, 郑险峰, 李世清, 等. 农田秸秆覆盖条件下冬小麦增产的水氮条件[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 55-59.
Gao Y J, Zhen X F, Li S Q *et al*. Requirements of water and nitrogenous fertilizer to increase winter wheat yield under straw mulch[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2008, 24(1): 55-59.

[2] 胡芬, 姜雁北. 半湿润易旱区农业节水技术研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(1): 76-80.
Hu F, Jiang Y B. Study on water-saving techniques of agriculture in semi humid and liable to drought region[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 1998, 14(1): 76-80.

[3] 陈奇恩. 中国塑料薄膜覆盖农业[J]. 中国工程科学, 2002, 4(4): 12-15, 21.
Chen Q E. Mulching agriculture using thin plastic film in China[J]. Chin. Eng. Sci., 2002, 4(4): 12-15, 21.

[4] 李生秀. 中国旱地土壤植物氮素[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Li S X. Soil and plant nitrogen in dryland areas of China[M]. Beijing: Science Press, 2008.

[5] 高亚军, 李云, 李生秀, 等. 旱地小麦不同栽培条件对土壤硝态氮残留的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2901-2910.
Gao Y J, Li Y, Li S X *et al*. Effects of different wheat cultivation methods on residual nitrate nitrogen in soil in dryland[J]. Acta Ecol. Sin., 2005, 25(11): 2901-2910.

[6] 王文静, 魏静, 马文奇, 等. 氮肥用量和秸秆根茬碳投入对黄淮海平原典型农田土壤有机质积累的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(13): 3591-3598.
Wang W J, Wei J, Ma W Q *et al*. Effect of nitrogen amendment and straw-stubble input on accumulation of soil organic matter in typical farmlands of Huang-Huai-Hai Plain[J]. Acta Ecol. Sin., 2010, 30(13): 3591-3598.

[7] Tilman D, Fargione J, Wolff B *et al*. Forecasting agriculturally driven global environmental change[J]. Science, 2001, 292(5515): 281-284.

[8] Rahman M A, Chikushi J, Saifizzaman M, Lauren J G. Rice straw mulching and nitrogen response of no-till wheat following rice in Bangladesh[J]. Field Crops Res., 2005, 91(1): 71-81.

[9] 陈辉林, 田霄鸿, 王晓峰, 等. 不同栽培模式对渭北旱塬区冬小麦生长期间土壤水分、温度及产量的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2424-2433.
Chen H L, Tiao X H, Wang X F *et al*. Effects of different cultivation models on soil water, soil temperature and yield during the winter wheat growth in the Weibei Dry Highland[J]. Acta Ecol.

Sin. 2010, 30(9): 2424-2433.

[10] Zhou J B, Wang C Y, Zhang H *et al*. Effect of water saving management practices and nitrogen fertilizer rate on crop yield and water use efficiency in a winter wheat-summer maize cropping system[J]. Field Crops Res., 2011, 122(2): 157-163.

[11] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 618-623.
Lao X R, Sun W H, Wang Z *et al*. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility[J]. Acta Pedol. Sin., 2003, 40(4): 618-623.

[12] 罗珠珠, 黄高宝, Li Guangdi, 等. 保护性耕作对旱作农田耕层土壤肥力及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1085-1092.
Luo Z Z, Huang G B, Li G D *et al*. Effects of conservation tillage on soil nutrients and enzyme activities in rainfed area[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(5): 1085-1092.

[13] 徐国伟, 段骅, 王志琴, 等. 麦秸还田对土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(3): 934-942.
Xu G W, Duan H, Wang Z Q *et al*. Effect of wheat-residue application on physical and chemical characters and enzymatic activities in soil[J]. Sci. Agric. Sin., 2009, 42(3): 934-942.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
Bao S D. Analysis of soil and agricultural chemistry (3rd edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.

[15] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 723-729.
Xu M G, Yu R, Wang B R. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization[J]. Acta Pedol. Sin., 2006, 43(5): 723-729.

[16] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. 生态学杂志, 1999, 18(3): 32-38.
Shen H, Cao Z H, Hu Z Y. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil[J]. Chin. J. Ecol., 1999, 18(3): 32-38.

[17] Conteh A, Blair G J, Macleod D A, Lefroy R D B. Soil organic carbon changes in cracking clay soils under cotton production as studied by carbon fractionation[J]. Aust. J. Agric. Res., 1997, 48(7): 1049-1058.

[18] Yan D Z, Wang D J, Yang L Z. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on labile organic matter fractions in a paddy soil[J]. Biol. Fert. Soils, 2007, 44(1): 93-101.

[19] 张付申. 长期施肥条件下塿土和黄绵土有机质氧化稳定性研究[J]. 土壤肥料, 1996, (6): 32-34.
Zhang F S. Effects of long-term application of fertilizers on the oxidable stability of organic matter in manural loessial soil and loessial soil[J]. Soils Fert., 1996, (6): 32-34.

[20] 全国农业技术推广中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999. 57-60.
Chinese Agriculture Technology and Popularization Center. Resource of organic fertilizer in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999. 57-60.

[21] 卜玉山, 苗果园, 周乃健, 等. 地膜和秸秆覆盖土壤肥力效应分析与比较[J]. 中国农业科学, 2006, 39(5): 1069-1075.
Bu Y S, Miao G Y, Zhou N J *et al*. Analysis and comparison of the effects of plastic film mulching and straw mulching on soil fertility[J]. Sci. Agric. Sin., 2006, 39(5): 1069-1075.

[22] Li Y S, Wu L H, Zhao L M *et al*. Influence of continuous plastic film mulching on yield, water use efficiency and soil properties of rice fields under non-flooding condition[J]. Soil Till. Res., 2007, 93(2): 370-378.

[23] 南雄雄, 田霄鸿, 张琳, 等. 小麦和玉米秸秆腐解特点及对土壤中碳、氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 626-633.
Nan X X, Tian X H, Zhan L *et al*. Decomposition characteristics of maize and wheat straw and their effects on soil carbon and nitrogen contents[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(3): 626-633.

[24] 李世清, 李生秀. 关中灌区夏季休闲效果评价[J]. 中国生态农业学报, 2000, 8(2): 54-57.
Li S Q, Li S X. Effects of summer fallow in Guanzhong irrigation area[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2000, 8(2): 54-57.

[25] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 272-276.
Dai Z G, Lu J W, Li X K *et al*. Nutrient release characteristics of different crop straws manure[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2010, 26(6): 272-276.

[26] Guo J H, Liu X J, Zhang Y *et al*. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327: 1008-1010.