

覆盖模式对农田土壤环境与冬小麦生长的影响

银敏华¹ 李援农¹ 李昊² 徐袁博¹ 张天乐¹ 谷晓博¹

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学经济管理学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 基于2年田间试验,对比研究了平作不覆盖(CK)、垄覆普通塑料地膜(M1)、垄覆普通塑料地膜至拔节期揭膜(M2)、垄覆生物降解膜(M3)和垄覆液态地膜(M4)5种覆盖模式对农田土壤水分、土壤温度和土壤养分及冬小麦生物量累积、生育进程、产量和水肥利用效率的影响。结果表明,垄覆普通塑料地膜、生物降解膜和普通塑料地膜至拔节期揭膜均具有一定的保墒作用,而垄覆液态地膜的保墒性则较差。连续2年试验后,各处理耕层(0~40 cm)土壤养分含量均较播前有所减少,其中处理M2和M3有机质含量较高,而处理M1最低。与对照相比,覆盖处理可明显增加冬小麦生长前中期土壤温度,促进冬小麦出苗、拔节及地上部生物量累积,同时能提高产量和水肥利用效率。其中,处理M2和M3的增加幅度最大,与处理CK相比,其2年平均产量分别提高25.93%和25.24%,平均水分利用效率分别提高27.86%和27.44%,平均肥料偏生产力分别提高25.94%和25.23%,且二者无显著差异,是陕西关中地区缓解残膜污染合理有效的冬小麦覆盖模式。

关键词: 冬小麦; 覆盖模式; 土壤水分; 土壤温度; 土壤养分; 产量

中图分类号: S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0127-09

Effects of Mulching Patterns on Farmland Soil Environment and Winter Wheat Growth

Yin Minhua¹ Li Yuannong¹ Li Hao² Xu Yuanbo¹ Zhang Tianle¹ Gu Xiaobo¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Two-year (2012—2014) field experiment was conducted to promote rainfall utilization efficiency and reduce agricultural pollution caused by plastic film in arid and semi-arid regions of China. A total of five treatments (CK: traditional flat planting with no mulching; M1: ridge-furrow planting with plastic film mulching over ridge; M2: ridge-furrow planting with plastic film mulching over ridge till jointing stage; M3: ridge-furrow planting with biodegradable film mulching over ridge; M4: ridge-furrow planting with liquid film mulching over ridge) were chosen to investigate the effects of different mulching patterns on farmland soil environment, including soil moisture, soil temperature and soil nutrient. In addition, accumulation of shoot dry mass, growth progress, yield, water use efficiency and partial fertilizer productivity of winter wheat were compared among treatments. The results showed that plastic film mulching (M1), biodegradable film mulching (M3) and plastic film mulching till jointing stage (M2) had significant effects on soil conservation, however, liquid film mulching (M4) was inferior in moisture keeping than those of M1, M2 and M3 treatments. Soil nutrient content was decreased after two experimental years in all treatments. Taking soil organic matter content for example, M2 and M3 had

收稿日期: 2015-08-27 修回日期: 2015-09-22

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503105)和国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA100504)

作者简介: 银敏华(1988—),女,博士生,主要从事节水灌溉技术研究,E-mail: 15109217864@163.com

通信作者: 李援农(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉技术及3S技术应用研究,E-mail: liyuannong@163.com

higher soil organic matter contents than those of the other treatments and M1 got the lowest soil organic matter content of the five treatments. This meant that mulching with plastic film for a long time would result in rapid decomposition of soil organic matter. Compared with CK, the mulching treatments could remarkably increase soil temperature at early and middle periods, consequently accelerated seedling rate, jointing rate and the accumulation of shoot dry mass, and thus promoted yield, water use efficiency and partial fertilizer productivity of winter wheat. Among the four mulching treatments, M2 and M3 could increase wheat yield, water use efficiency and partial fertilizer productivity to a great extent. Compared with CK, M2 and M3 averagely increased yield by 25.93% and 25.24%, increased water use efficiency by 27.86% and 27.44% and increased partial fertilizer productivity by 25.94% and 25.23% in two years, respectively. And there was no significant difference between them. In conclusion, M2 and M3 were appropriate mulching patterns with less agricultural pollution for winter wheat cultivation in Guanzhong Region, Shaanxi Province.

Key words: winter wheat; mulching patterns; soil moisture; soil temperature; soil nutrient; yield

引言

冬小麦-夏玉米轮作是陕西关中地区粮食作物的主要耕作制度,其中冬小麦生育期长且同期降水量少,水热资源不足是其生产的主要限制因子。因此,通过覆盖措施蓄水保温以提高土壤水热有效性成为该区冬小麦高产稳产的重要保障^[1-4]。

地膜覆盖因其具有改善耕层土壤水热条件、防止农田水土流失和减少氮素淋溶等诸多优点,已成为中国特别是中国北方地区农业生产的主要模式^[5-6]。然而,随着地膜覆盖面积的增加和使用年限的延长,加上地膜质量得不到保障,农田中聚积的残膜量逐渐增多,造成耕层土壤理化性质和土壤营养状况大幅度下降,严重阻碍了作物根系发育及其对水肥的吸收利用,进而影响农业生态系统的持续发展,导致地膜这一“白色革命”变为“白色污染”,甚至“白色灾难”^[7-8]。为了缓解该农田污染问题,近年来,新型的液态地膜和可降解地膜等环保覆盖材料相继问世。研究表明,液态地膜较普通塑料地膜更有利于降水入渗,可有效改善土壤结构并减少环境污染^[9-10]。与露地栽培相比,覆盖可降解地膜能明显提高农田土壤温度和水分,加快作物生育进程^[11]。生物降解膜与普通塑料地膜在集雨保墒和促进作物增产方面无显著差异,可替代普通塑料地膜用于农业生产^[6]。对不同作物在适当时期揭膜也可在改善土壤水热状况、促进作物增产高效的同时,一定程度上减少地膜对土壤环境的负效应。研究发现,冬小麦覆膜75~150 d、春小麦覆膜30~60 d和春玉米覆膜到抽雄期,均可增强根系透气性,优化光合产物分配,增加籽粒产量并提高水肥利用效率^[12-13]。对北疆膜下滴灌早熟棉田适时揭膜,不仅能延缓棉花早衰,促进产量形成,而且有利于残膜回

收,回收率高达85.56%^[14-15]。

如何将覆盖栽培的高产增收效应与减少农田污染有机结合是实现现代生态型旱地农业可持续发展的必然要求。目前关于环保地膜的研究主要集中于原材料组成、降解性能及覆盖效应等方面^[16-18],关于环保地膜和覆膜后揭膜的田间应用主要以玉米^[6,11,13]、棉花^[14-15,19]等作物为主,而较少涉及冬小麦,尤其是系统比较二者对冬小麦生长及农田土壤环境的综合响应机制较为缺乏。鉴于此,本文通过2年田间试验,对比研究平作不覆盖、垄覆普通塑料地膜、垄覆普通塑料地膜至拔节期揭膜、垄覆生物降解膜和垄覆液态地膜对农田土壤水分、土壤温度和土壤养分及冬小麦生物量累积、生育进程、产量和水肥利用效率的影响,以期为该区充分利用降水资源、合理进行地膜覆盖和有效缓解残膜污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2012年10月—2014年6月在西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室试验站进行。该区位于108°24'E,34°20'N,海拔高度521 m,全年无霜期210 d,年均降水量632 mm,主要分布在7—9月份,年均蒸发量1500 mm。土壤质地为中壤土(0~40 cm土壤颗粒组成为:大于2 mm颗粒质量分数7.78%,0.5~2 mm颗粒质量分数13.89%,0.25~0.5 mm颗粒质量分数10.26%,小于等于0.25 mm颗粒质量分数68.07%),1 m土层平均田间持水率23%~25%,凋萎含水率8.5%(均为质量含水率),平均干容重1.44 g/cm³。耕层土壤(0~40 cm)基础肥力(质量比)为:有机质11.18 g/kg,全氮0.94 g/kg,全磷0.60 g/kg,全钾14.10 g/kg;硝

态氮 76.01 mg/kg, 速效磷 25.22 mg/kg, 速效钾 131.97 mg/kg。2012—2013 年和 2013—2014 年冬小麦生育期降水量分别为 227.4 mm 和 206.3 mm, 平均气温分别为 8.7℃ 和 8.4℃, 平均日照时数分别为 1 534.3 h 和 1 471.5 h。

1.2 试验设计

供试冬小麦品种为小偃 22 号。试验采用垄沟种植技术, 垄、沟宽均为 30 cm, 垄高 20 cm。试验设 5 个处理, 分别为垄覆普通塑料地膜 (M1)、垄覆普通塑料地膜至拔节期揭膜 (M2)^[12]、垄覆生物降解膜 (M3) 和垄覆液态地膜 (M4), 以平作不覆盖 (CK) 为对照。每个处理重复 3 次, 共 15 个小区。小区面积为 20 m² (4 m × 5 m), 随机区组排列 (2 年同一小区处理一致)。试验用普通塑料地膜 (山西运城塑料厂生产) 和生物降解膜 (陕西杨凌瑞丰环保科技有限公司生产) 膜宽 60 cm, 膜厚 0.008 mm; 液态地膜 (浙江艾可泰投资有限公司生产) 按推荐质量比 1:9 兑水稀释后均匀喷洒于垄上。

1.3 田间管理

于播种前 7 d 深翻并平整田地, 挖沟起垄, 冬小麦植于沟内, 每沟 3 行, 播种量为 180 kg/hm²。氮肥 (尿素, N 质量分数 46%) 120 kg/hm² (纯 N), 基追比为 2:3, 各处理磷肥 (过磷酸钙, P₂O₅ 质量分数 16%) 120 kg/hm² (纯 P₂O₅) 和钾肥 (硫酸钾, K₂O 质量分数 50%) 60 kg/hm² (纯 K₂O) 作为基肥于翻地前均匀撒施, 追施氮肥在冬小麦拔节期进行。2 个冬小麦生育期内, 因气候干旱, 分别补灌 60 mm 越冬水和 60 mm 拔节水。其他管理措施同一般高产田。2012 年 10 月 17 日播种, 次年 6 月 4 日收获; 2013 年 10 月 15 日播种, 次年 6 月 2 日收获。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤贮水量

于冬小麦播种前、收获后 (0 ~ 100 cm 每 10 cm 取 1 个土样, 100 ~ 200 cm 每 20 cm 取 1 个土样) 及主要生育期 (苗期、拔节期、抽穗期和灌浆期, 0 ~ 100 cm 每 10 cm 取 1 个土样) 采用干燥法分层测定土壤含水率。取土位置为小区中央沟内相邻小麦行的中心区域。土壤贮水量计算公式^[20]为

W = 10HρB (1)

式中 W——土壤贮水量, mm

H——土层深度, cm

ρ——土壤干容重, g/cm³

B——土壤质量含水率, %

土壤总贮水量为每层土壤贮水量之和。

1.4.2 土壤温度

采用曲管地温计 (置于各处理冠层覆盖度相近

的位置) 测定各处理垄上和沟内土壤温度 (5、10、15、20、25 cm)。从播种当天起每 15 d 左右测定一次, 测定时间为 08:00—18:00 (每 2 h 测 1 次), 取其平均值作为日平均土壤温度。

1.4.3 土壤养分

测定播种前及收获后耕层土壤 (0 ~ 40 cm) 养分。采用重铬酸钾外加热法测定有机质含量; 凯氏定氮仪 (FOSS 2300 型) 测定全氮, 钼锑抗比色法测定全磷, 火焰分光光度计法测定全钾; 碱解扩散法测定碱解氮, 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提比色法测定速效磷, NH₄OAc 浸提火焰光度法测定速效钾。

1.4.4 地上部生物量

分别于冬小麦苗期、拔节期、抽穗期和灌浆期, 各小区选取代表性植株 20 株, 按器官分离, 于 105℃ 杀青 30 min, 75℃ 干燥至质量恒定后称量。

1.4.5 生育进程

观察并记录各处理出苗、拔节、抽穗、灌浆和成熟的持续时间。

1.4.6 水肥利用效率

根据收获时冬小麦产量和生育期蒸散量计算水分利用效率, 其计算公式为

W_{UE} = 10 $\frac{G_Y}{ET}$ (2)

其中 ET = P + W₁ - W₂ + I + K - R (3)

式中 W_{UE}——水分利用效率, kg/m³

G_Y——籽粒产量, kg/hm²

ET——生育期总蒸散量, mm

P——生育期内降水量, mm

W₁、W₂——收获后和播种前 0 ~ 200 cm 土层土壤贮水量, mm

I——灌溉水量, mm

K——时段内地下水补给量, mm

R——时段内地表径流, mm

由于冬小麦生育期内次降水量较小, 且试验区地下水埋深在 5 m 以下, 可忽略径流和地下水补给。

肥料偏生产力 (kg/kg) 为冬小麦籽粒产量与总施肥量的比值。

1.5 数据分析

分别采用 Excel 2010 和 DPS 7.05 进行数据整理与统计分析, 方差分析使用最小显著差异法 (LSD) 进行 (P < 0.05), 使用 Origin 8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖模式的土壤水分效应

覆盖种植通过改变降水时空分布、土壤蒸发和植株蒸腾而影响土壤水分状况。土壤贮水量是一定

时期内土壤水分收支的综合反映。不同覆盖模式下冬小麦主要生育期土壤贮水量动态变化如图 1 所示。由图 1 知,无论是覆盖处理,还是平作条播,冬小麦成熟期 0~100 cm 土层土壤水分消耗均较为严

重,表现为土壤贮水量的负增长。其中播前基础土壤贮水量在 250~278 mm 之间,而收获后则为 195~250 mm。冬小麦生育期内土壤贮水量整体呈 V 型变化,且覆盖处理显著高于对照 ($P<0.05$)。

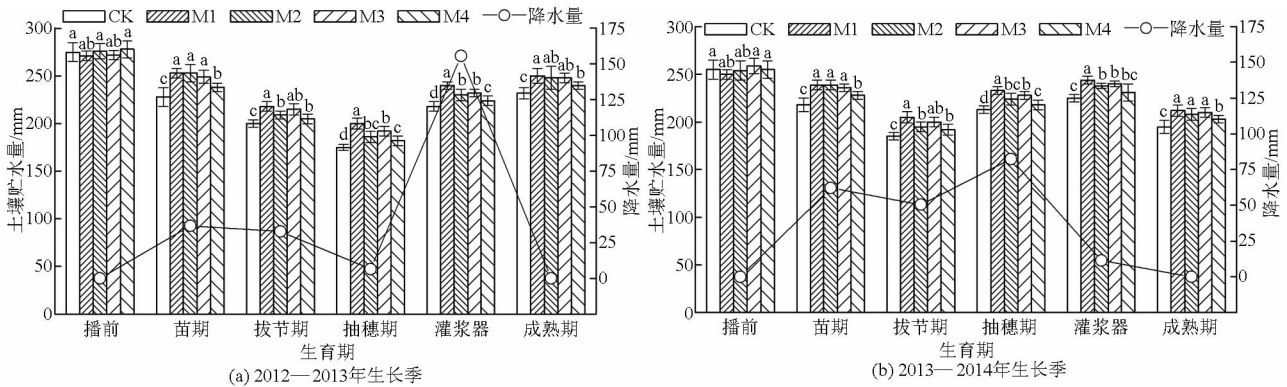


图 1 不同覆盖模式下冬小麦各生育期 0~100 cm 土层土壤贮水量变化
Fig. 1 Soil water storage of 0~100 cm at each growth stage of winter wheat under different mulching patterns

2012—2013 年生长季,播种前经 7 d 左右晒田,播种时处理间土壤贮水量无显著差异。苗期各覆盖处理的土壤贮水量表现为处理 M3 与处理 M1 和 M2 无显著差异,但显著高于处理 M4 ($P<0.05$)。拔节期 M2 处理揭膜,其土壤贮水量与处理 M3 和 M4 差异不显著,这与生物降解膜和液态地膜开始降解及各处理进行等量灌水有关。抽穗期和灌浆期生物降解膜和液态地膜大面积破损,与处理 M1 相比,处理 M2、M3 和 M4 的土壤贮水量显著下降 ($P<0.05$)。成熟期处理 M1 由于较高的土壤温度导致冬小麦衰老加快,土壤蒸发增强,其土壤贮水量与处理 M2 和 M3 无显著差异,但仍高于处理 CK 和 M4。可见,冬小麦拔节之前,生物降解膜与普通塑料地膜的保墒效果相当,随后生物降解膜逐渐降解,其保墒性有所下降。但就整个生育期而言,垄覆普通塑料地膜、生物降解膜和普通塑料地膜至拔节期揭膜均具有一定

的保墒作用,而垄覆液态地膜的保墒性则较差。

2013—2014 年冬小麦生长中后期降雨较少,各处理成熟期 0~100 cm 土层土壤含水率较 2012—2013 年整体偏低,但该期处理间土壤贮水量变化特征与 2013—2014 年生长季基本一致。

2.2 不同覆盖模式的土壤温度效应

土壤温度是土壤热状况的反映,主要受太阳辐射、地表覆盖及植株生长等因素的影响。覆盖可提高土壤温度,尤其能增加作物生长前期的土壤温度。5 cm 土层是土壤温度变化活跃层^[13]。现以 2012—2013 年冬小麦生长季 5 cm 和 25 cm 土层平均土壤温度随播种后天数的变化特征为例进行分析(表 1)。由表 1 可知,覆盖的增温效应主要体现在越冬前,此后随生育期推进,处理间土壤温度差异有所减小。

5 cm 土层处,播种后 15~60 d,生物降解膜与普通塑料地膜的增温效果接近,但显著高于液态地膜

表 1 不同覆盖模式下 5 cm 和 25 cm 土层平均土壤温度

Tab. 1 Average soil temperature at 5 cm and 25 cm depths under different mulching patterns		℃													
土层深度/ cm	处理	播种后天数/d													
5	CK	22.8 ^c	16.3 ^c	13.1 ^c	8.0 ^c	2.8 ^c	1.5 ^c	-1.8 ^c	3.5 ^c	8.4 ^c	12.5 ^c	16.9 ^c	23.9 ^b	25.7 ^b	28.8 ^b
	M1	25.2 ^a	18.0 ^a	14.9 ^a	9.1 ^a	4.0 ^a	2.2 ^a	-1.2 ^a	4.8 ^a	9.6 ^a	14.7 ^a	18.3 ^a	25.3 ^a	26.5 ^a	29.0 ^a
	M2	25.2 ^a	18.0 ^a	14.9 ^a	9.1 ^a	4.0 ^a	2.2 ^a	-1.2 ^a	4.8 ^a	9.6 ^a	14.0 ^b	17.2 ^b	23.8 ^b	25.5 ^b	28.5 ^b
	M3	25.0 ^a	17.8 ^a	14.7 ^a	8.8 ^a	3.9 ^a	2.1 ^a	-1.3 ^a	4.6 ^a	9.3 ^{ab}	13.9 ^b	17.5 ^b	24.0 ^b	25.6 ^b	28.3 ^b
	M4	24.5 ^b	17.2 ^b	14.1 ^b	8.3 ^b	3.3 ^b	1.8 ^b	-1.6 ^b	4.1 ^b	8.8 ^b	13.7 ^b	17.4 ^b	23.9 ^b	25.4 ^b	29.0 ^b
25	CK	19.5 ^c	14.0 ^c	11.8 ^c	6.9 ^c	2.5 ^b	1.8 ^c	-1.2 ^c	3.8 ^c	8.0 ^c	11.5 ^c	16.0 ^c	22.6 ^b	23.9 ^b	27.0 ^a
	M1	22.6 ^a	16.2 ^a	13.4 ^a	8.1 ^a	3.4 ^a	2.5 ^a	-0.5 ^a	5.0 ^a	9.1 ^a	13.9 ^a	17.5 ^a	24.1 ^a	24.5 ^a	27.2 ^a
	M2	22.6 ^a	16.2 ^a	13.4 ^a	8.1 ^a	3.4 ^a	2.5 ^a	-0.5 ^a	5.0 ^a	9.1 ^a	13.5 ^b	16.6 ^b	22.5 ^b	23.7 ^b	27.1 ^a
	M3	22.5 ^a	16.0 ^a	13.2 ^a	8.0 ^a	3.2 ^a	2.4 ^a	-0.5 ^a	4.7 ^a	8.7 ^b	13.4 ^b	16.5 ^b	22.4 ^b	23.6 ^b	27.0 ^a
	M4	22.1 ^b	15.5 ^b	12.7 ^b	7.6 ^b	2.9 ^{ab}	2.1 ^b	-0.9 ^b	4.3 ^b	8.5 ^b	13.3 ^b	16.3 ^b	22.7 ^b	23.5 ^b	27.1 ^a

注:数据为垄上和沟内土壤温度平均值。同列数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著,下同。

($P < 0.05$)。播种后 75 ~ 120 d,随着大气温度逐渐下降,各覆盖处理的增温效应随之减弱。其中播种后 90 d 处理间土壤温度相差 0.3 ~ 0.7℃,播种后 115 d 处理间土壤温度相差 0.2 ~ 0.6℃。播种后 135 d,气温陆续回升,处理间土壤温度差异加大。期间由于生物降解膜和液态地膜逐渐变薄、变脆并出现一定破损,处理 M2 揭膜,与普通塑料地膜相比,三者增温效果均大幅度下降。播种后 150 d 之后,处理 M2 和 M3 与处理 CK 的土壤温度基本接近,甚至略有降低。这与处理 M2 和 M3 植株长势好,冠层覆盖度高有关,而处理 M1 仍表现出一定的增温效应。

与 5 cm 土层相比,各处理 25 cm 土层处的土壤温度变幅较小,5 cm 处为 -1.8 ~ 29.0℃,25 cm 处则为 -1.2 ~ 27.2℃。

2.3 不同覆盖模式的土壤养分效应

土壤水热状况影响土壤微生物活性、养分转化

与释放及作物养分吸收利用,进而影响土壤养分状况。土壤中有有机质和氮、磷、钾含量是土壤肥力的标志,也是实现作物高产优质的基础。表 2 为连续 2 年冬小麦试验后各处理耕层土壤(0 ~ 40 cm)平均养分含量。由表 2 分析知,连续 2 年冬小麦试验结束后,各处理土壤养分均较播前基础养分有所减少。土壤有机质含量表现为覆盖处理小于对照,其中处理 M1 最低,处理 M4 次之,处理 M2 和 M3 较高,且二者无显著差异。可见,全程普通塑料地膜覆盖会加速土壤有机质分解。处理间土壤全氮、全磷和全钾含量差异不显著。这与每个生长季施用化学肥料有关。与土壤有机质类似,处理间土壤碱解氮、速效磷和速效钾也表现为覆盖处理低于对照,且处理 M2 和 M3 的含量最低,说明覆盖普通塑料地膜至拔节期揭膜与覆盖生物降解膜可有效促进冬小麦吸收利用耕层速效养分,而全程普通塑料地膜覆盖和液态膜覆盖则促进作用较小。

表 2 连续 2 年试验后不同覆盖模式耕层(0 ~ 40 cm)土壤平均养分含量(质量比)

Tab.2 Average soil nutrient contents of 0 ~ 40 cm depth under different mulching treatments after 2-year experiment							
处理	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	全钾/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
CK	11.53 ^a	0.88 ^a	0.56 ^a	14.05 ^a	34.55 ^a	15.33 ^a	128.32 ^a
M1	10.02 ^d	0.89 ^a	0.52 ^a	13.86 ^a	34.82 ^a	14.64 ^{ab}	115.27 ^b
M2	10.65 ^b	0.90 ^a	0.55 ^a	14.00 ^a	30.01 ^c	12.45 ^c	107.74 ^c
M3	10.58 ^b	0.87 ^a	0.55 ^a	13.95 ^a	29.88 ^c	12.60 ^c	109.51 ^c
M4	10.43 ^c	0.90 ^a	0.57 ^a	13.81 ^a	32.73 ^b	14.11 ^b	116.49 ^b

2.4 不同覆盖模式的生物效应

2.4.1 不同覆盖模式对冬小麦地上部生物量的影响

不同覆盖模式对冬小麦地上部生物量累积的影响如表 3 所示。由表 3 知,2 个冬小麦生长季中,地上部生物量均表现为覆盖处理显著($P < 0.05$)高于对照,且处理 M2 和 M3 显著($P < 0.05$)高于处理 M1 和 M4。苗期和拔节期覆盖处理较优的土壤水热和养分条件可有效促进冬小麦生长,其平均地上部生物量分别较处理 CK 提高 34.01% 和 33.56%。进入抽穗期后,大气温度逐渐回升,此时覆膜的增温和封闭环境会加速根系衰老,进而对冬小麦生长产生一定的负效应。处理 M2、M3 和 M4 经揭膜和部

分降解等过程,一定程度上有助于冬小麦生长。其中,处理 M2 和 M3 的平均地上部生物量在抽穗期分别较处理 M1 增加 14.84% 和 15.14%,在灌浆期分别较处理 M1 增加 14.44% 和 14.42%;而处理 M4 与处理 M1 间无显著差异。可见,全程普通塑料地膜覆盖对冬小麦后期生长不利,与液态地膜相比,覆盖普通塑料地膜至拔节期揭膜和覆盖生物降解膜可为冬小麦生长创造较为适宜的环境。

2.4.2 不同覆盖模式对冬小麦生育进程的影响

不同覆盖处理由于土壤水热状况存在差异,会影响冬小麦生育进程。各处理冬小麦的生育进程如表 4 所示。由表 4 分析知,与对照相比,覆盖处理较

表 3 覆盖模式对冬小麦地上部生物量累积的影响

Tab.3 Effects of different mulching patterns on accumulation of shoot dry mass for winter wheat									t/hm ²
处理	2012—2013 年				2013—2014 年				
	苗期	拔节期	抽穗期	灌浆期	苗期	拔节期	抽穗期	灌浆期	
CK	1.13 ± 0.02 ^c	2.21 ± 0.10 ^c	4.45 ± 0.12 ^c	5.59 ± 0.22 ^c	1.20 ± 0.05 ^c	2.33 ± 0.02 ^c	4.68 ± 0.11 ^d	5.43 ± 0.17 ^c	
M1	1.61 ± 0.11 ^a	3.10 ± 0.22 ^a	5.03 ± 0.09 ^b ^c	6.26 ± 0.32 ^b	1.63 ± 0.09 ^a	3.13 ± 0.02 ^a	5.59 ± 0.28 ^b	6.43 ± 0.39 ^b	
M2	1.60 ± 0.08 ^a	3.11 ± 0.24 ^a	6.01 ± 0.26 ^a	7.23 ± 0.27 ^a	1.65 ± 0.12 ^a	3.10 ± 0.02 ^a	6.16 ± 0.15 ^a	7.29 ± 0.32 ^a	
M3	1.58 ± 0.12 ^a	3.02 ± 0.19 ^a	6.13 ± 0.22 ^a	7.17 ± 0.35 ^a	1.56 ± 0.15 ^a	3.05 ± 0.02 ^a	6.06 ± 0.32 ^a	7.35 ± 0.52 ^a	
M4	1.43 ± 0.07 ^b	2.83 ± 0.11 ^b	5.52 ± 0.18 ^b	6.28 ± 0.52 ^b	1.42 ± 0.14 ^b	2.90 ± 0.02 ^b	5.23 ± 0.35 ^c	6.05 ± 0.42 ^{bc}	

注:数据为 3 个重复的平均值 ± 标准差。

好的土壤水热环境可促进冬小麦出苗并加快进入拔节期。之后,处理 M2 揭膜,生物降解膜和液态地膜逐渐降解,处理 M2、M3 和 M4 的增温效应随之减弱,且与处理 CK 几乎同时进入抽穗期。而处理 M1 在较高的大气温度和普通塑料地膜保温效应的综合作用下表现出一定程度的早衰现象。

表 4 不同覆盖模式下冬小麦的生育进程(播种后天数)
Tab.4 Growth process of winter wheat under different mulching patterns (days after sowing) d

年份	处理	出苗期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
2012—2013 年	CK	11	144	175	205	230
	M1	9	137	173	203	226
	M2	9	137	175	209	234
	M3	9	138	175	207	233
	M4	10	140	176	205	232
2013—2014 年	CK	12	145	176	206	230
	M1	10	139	171	201	225
	M2	10	139	174	208	233
	M3	10	140	174	209	233
	M4	10	141	175	207	232

就总生育期而言,2 个冬小麦生长季中处理 M1 的生育期最短,平均较处理 CK 缩短 4.5 d,而处理 M2、M3 和 M4 的平均生育期则分别较处理 CK 延长 3.5、3.0、2.0 d。延长生育周期,尤其是延长生殖生

长周期,对于改善作物穗部性状,提高经济产量和水氮利用效率具有重要意义^[13]。

2.4.3 不同覆盖模式对冬小麦产量的影响

不同覆盖模式对冬小麦产量及其构成因素的影响如表 5 所示。由表 5 知,各覆盖处理的产量及其构成因素均优于对照。其中不同覆盖处理间穗长无显著差异,但显著高于处理 CK($P<0.05$)。穗粒数的结果表明覆盖普通塑料地膜至拔节期揭膜和覆盖生物降解膜均能显著增加穗粒数。其中,处理 M2 和 M3 的穗粒数在第 1 个生长季分别较处理 CK 增加 11.14% 和 9.78%;第 2 个生长季分别较处理 CK 增加 10.96% 和 9.86%。各覆盖处理冬小麦单位面积有效穗数表现为处理 M1、M2 和 M3 大于处理 M4,说明与液态地膜相比,覆盖普通塑料地膜和覆盖生物降解膜均有助于冬小麦产生分蘖并最终发育成穗。处理间千粒质量的变化与有效穗数类似。处理 M2 和 M3 的籽粒产量在第 1 个生长季分别较处理 M1 增加 10.81% 和 9.18%,较处理 M4 增加 15.80% 和 14.10%;在第 2 个生长季分别较处理 M1 增加 10.62% 和 11.05%,较处理 M4 增加 15.87% 和 16.32%。可见,处理 M2 和 M3 可有效协调土壤水肥供应与植株需求间的矛盾,有利于冬小麦经济产量的形成。

表 5 不同覆盖模式对冬小麦产量及其构成因素的影响

Tab.5 Effects of different mulching patterns on yield and its components of winter wheat

年份	处理	穗长/cm	穗粒数/(粒·穗 ⁻¹)	有效穗数/(穗·m ⁻²)	千粒质量/g	籽粒产量/(kg·hm ⁻²)
2012—2013 年	CK	4.56 ^b	36.8 ^c	830 ^c	46.21 ^d	7 514 ^d
	M1	4.67 ^a	38.3 ^b	935 ^a	46.93 ^b	8 358 ^b
	M2	4.69 ^a	40.9 ^a	958 ^a	47.78 ^a	9 261 ^a
	M3	4.70 ^a	40.4 ^a	951 ^a	47.53 ^a	9 125 ^a
	M4	4.65 ^a	38.5 ^b	892 ^b	46.55 ^c	7 997 ^c
2013—2014 年	CK	4.59 ^b	36.5 ^c	846 ^c	46.19 ^c	7 126 ^d
	M1	4.70 ^a	39.0 ^b	941 ^a	46.88 ^b	8 294 ^b
	M2	4.72 ^a	40.5 ^a	955 ^a	47.71 ^a	9 175 ^a
	M3	4.70 ^a	40.1 ^a	960 ^a	47.82 ^a	9 210 ^a
	M4	4.68 ^a	38.3 ^b	902 ^b	46.75 ^b	7 918 ^c

2.5 不同覆盖处理的水肥利用效率

水肥利用效率是评价覆盖栽培效应的一项重要指标。不同覆盖模式的水分利用效率及肥料偏生产力如图 2 所示。由图 2a 分析知,连续 2 个冬小麦生长季,处理间水分利用效率表现为覆盖处理高于对照,其中处理 M2 和 M3 最高,且二者无显著差异。其平均水分利用效率分别较处理 CK 提高 27.86% 和 27.44% ($P<0.05$),较处理 M1 提高 10.13% 和 9.77% ($P<0.05$),较处理 M4 提高 16.66% 和 16.28% ($P<0.05$)。可见,处理 M2 和 M3 在提高

土壤储水能力、降低水分无效蒸发的同时,可更有效地促进冬小麦经济产量的形成,从而获得较高的水分利用效率。

肥料偏生产力是土壤肥力与肥料效率的综合反映。由图 2b 分析知,在相同施肥量及施肥条件下,处理间肥料偏生产力由大到小表现为处理 M2 和 M3、处理 M1、处理 M4、处理 CK,且处理间差异显著($P<0.05$)。可见,覆盖处理能有效提高肥料偏生产力,其中,覆盖普通塑料地膜至拔节期揭膜和覆盖生物降解膜的增加幅度较高,其 2 年平均肥料偏生产力

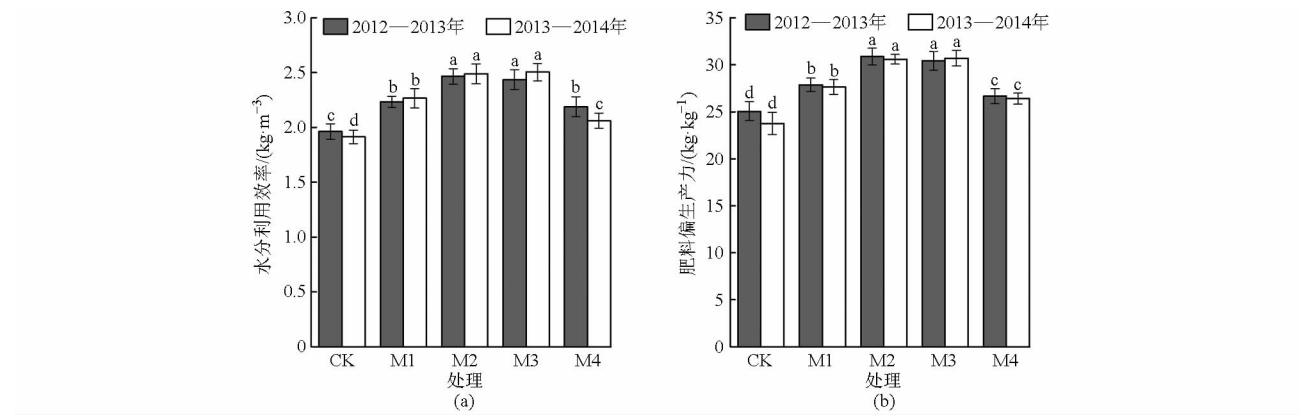


图 2 不同覆盖模式的水分利用效率和肥料偏生产力

Fig. 2 Water use efficiency and partial fertilizer productivity of different mulching patterns

分别较处理 CK 提高 25.94% 和 25.23% ($P < 0.05$)。第 1 个生长季各处理肥料偏生产力较第 2 个生长季整体偏高,这主要与冬小麦生育期内降水分布有关。

3 讨论

3.1 覆盖栽培对农田土壤环境的影响

覆盖栽培可改善农田生态小气候,使作物根系土壤的水、肥、气、热等环境协调同步,是干旱半干旱地区农业可持续发展的重要途径^[21]。

覆盖栽培可提高土壤水分有效性。张杰等^[6]研究表明,与对照相比,覆盖普通塑料地膜和覆盖生物降解膜条件下,玉米各生育期 0~60 cm 土层土壤贮水量均有所提高,且与液态地膜和不覆盖处理相比有显著差异。韩娟等^[22]研究发现,覆盖栽培可提高冬小麦生育前期 0~20 cm 和 20~100 cm 土层土壤贮水量,其中垄覆地膜沟覆液膜处理由于液膜的降解,仅在小麦生长前期具有一定的保水性。本研究结果表明,冬小麦成熟期 0~100 cm 土层土壤水分消耗均较为严重,表现为土壤贮水量的负增长。生物降解膜与普通塑料地膜在冬小麦拔节之前保墒效果相当,随后生物降解膜逐渐降解,其保墒性有所下降,但仍显著高于对照。就整个生育期而言,普通塑料地膜、生物降解膜与普通塑料地膜至拔节期揭膜均具有一定的保墒作用,而液态地膜的保墒性则较差。这与文献^[6,22]的研究结果一致。

覆盖栽培的另一特点是可以提高土壤温度。研究表明,春小麦生长前期较高的土壤温度可促进幼苗生长,覆膜条件下 5 cm 土层土壤温度呈 U 型变化,即对作物生长前期和后期的影响显著,而对生长中期的影响较小^[23-24]。本研究对上述结论也有所证实,对 5 cm 土层处平均土壤温度随播种后天数的研究发现,处理 M2、M3 和 M4 的增温效应主要体现在冬小麦生长前期和中期,而处理 M1 的增温效应

则贯穿于冬小麦整个生育期。申丽霞等^[11]对玉米的研究发现,可降解地膜覆盖在提高并保持土壤温度方面与普通地膜作用相当。这与本研究结果有所不同,可能是由于冬小麦生育期较玉米长,其生长中后期可降解地膜基本降解,保温效应丧失。在中国北方地区,覆盖种植的保温作用对于冬小麦及春播作物具有重要意义,但作物生长后期随着大气温度逐渐回升,此时的增温效应对作物生长和产量形成无实际意义,反而会加速植株衰老。

覆盖栽培在影响土壤水热条件的同时,会影响土壤养分含量与分布。土壤养分中有机质含量的增减,是衡量栽培措施的重要标准^[25]。任小龙等^[26]研究表明,与平作相比,垄沟集雨种植后,耕层土壤有机质和速效氮、磷、钾含量明显增加。而宋秋华等^[27]研究发现,不同覆膜时长对土壤有机质含量影响显著,与播种前相比,全程覆膜处理有机质含量下降 21.2%,覆膜 60 d 处理含量下降 17.2%,而覆膜 30 d 和未覆膜处理含量下降相对较小。本研究发现,连续 2 年冬小麦试验结束后,各处理土壤养分含量均较播前基础养分有所减少。其中,处理 M1 土壤有机质含量最低,而处理 M2 和 M3 土壤有机质含量较高。这主要是由于全程覆膜条件下耕层土壤水热状况良好,微生物数量多且活性高,对有机质分解作用加强,从而导致土壤有机质含量降低。从维持土壤肥力和农田生态系统可持续发展出发,不应提倡全程或长期地膜覆盖。

另外,本文仅对不同覆盖模式下农田土壤水分、土壤温度和土壤养分等土壤环境进行了研究,而未涉及土壤微生物数量和土壤酶活性,在今后的研究中需要进一步完善。

3.2 覆盖栽培对作物生育进程的影响

作物在品种、播期等相同的条件下,土壤水热环境是影响其生育期长度和生育进程的主要因素。不同覆盖栽培的土壤水热状况不同,使得作物生育进

程存在差异。研究表明,地膜覆盖较高的土壤温度可明显加快玉米生长发育,与对照相比,苗期提早 2 d,拔节、抽穗、灌浆和成熟期平均提早 9 ~ 13 d,其中灌浆到成熟期缩短 4 d^[28]。不同覆盖材料对作物生育进程的影响从大到小顺序为普通塑料地膜、可降解地膜、对照^[12]。本研究也得出类似的结论,与对照相比,覆盖处理较好的土壤水热条件可促进冬小麦出苗并加快进入拔节期。其中处理 M1 的生育期最短,平均较处理 CK 缩短 4.5 d。这主要是由于普通塑料地膜覆盖后期的增温效应容易导致作物早衰^[29]。

3.3 覆盖栽培对作物产量和水肥利用效率的影响

覆盖栽培可显著改善农田土壤水热状况,促进作物生长发育,从而提高经济产量和水肥利用效率。方日尧等^[30]研究表明,与普通塑料地膜覆盖和秸秆覆盖相比,渗水地膜覆盖条件下冬小麦产量可分别提高 43.1% 和 40.4%。陈玉章等^[31]研究表明,覆盖处理可显著提高冬小麦产量,尤其能提高有效穗数和千粒质量。LI 等^[4]研究发现,覆盖栽培能显著改善作物生长的水肥环境,提高肥料利用率。本研究表明,2 个冬小麦生长季各覆盖处理的产量和水肥利用效率均显著高于对照。其中处理 M2 和 M3 的增加幅度较大。

4 结 论

(1)与播种前相比,各处理冬小麦成熟期土壤水分消耗均较为严重。生物降解膜与普通塑料地膜在冬小麦拔节之前保墒效果相当,随后生物降解膜

逐渐降解,其保墒性有所下降,但仍显著高于对照。就整个生育期而言,垄覆普通塑料地膜、生物降解膜与普通塑料地膜至拔节期揭膜均具有一定的保墒作用,而液态地膜的保墒性则较差。

(2)覆盖栽培的增温效应主要体现在越冬前。此后,随生育期推进,处理间土壤温度差异逐渐减小。其中,处理 M2、M3 和 M4 的土壤温度在播种后 150 d 左右与处理 CK 基本相同,甚至有所降低,而处理 M1 则在整个冬小麦生育期均表现出一定的增温效应。

(3)连续 2 年冬小麦试验结束后,各处理耕层土壤养分含量均较播前基础养分有所减少。其中有机质含量表现为处理 M2 和 M3 较高,而处理 M1 最低。

(4)与处理 M1 和 M4 相比,处理 M2 和 M3 可更有效地促进冬小麦出苗、拔节及地上部生物量累积,同时能提高产量和水肥利用效率。与处理 CK 相比,其 2 年平均产量分别提高 25.93% 和 25.24%,平均水分利用效率分别提高 27.86% 和 27.44%,平均肥料偏生产力分别提高 25.94% 和 25.23%。

(5)综合考虑土壤水分、温度、养分及冬小麦生长、产量和水肥利用效率,处理 M2 与 M3 在保水、保温、促进冬小麦高产、水肥高效利用及缓解残膜污染等方面无显著差异,是陕西关中地区较为合理有效的冬小麦覆盖模式。就生产实践而言,覆盖普通塑料地膜至拔节期揭膜需要耗费较多的劳力,而覆盖生物降解膜则成本较高。

参 考 文 献

1 HOU X Y, WANG F X, HAN J J, et al. Duration of plastic mulch for potato growth under drip irrigation in an arid region of northwest China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 119(1): 115 – 121.

2 银敏华,李援农,张天乐,等. 集雨模式对农田土壤水热状况与水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 194 – 203, 211.

YIN Minhua, LI Yuannong, ZHANG Tianle, et al. Effects of different rainwater harvesting patterns on soil hydrothermal regimes and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 194 – 203, 211. (in Chinese)

3 王志超,李仙岳,史海滨,等. 农膜残留对土壤水动力参数及土壤结构的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 101 – 106, 140.

WANG Zhichao, LI Xian Yue, SHI Haibin, et al. Effects of residual plastic film on soil hydrodynamic parameters and soil structure [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 101 – 106, 140. (in Chinese)

4 LI X Y, GONG J D. Effect of different ridge: furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches[J]. Agricultural Water Management, 2002, 54(3): 243 – 254.

5 ZHAO H, XIONG Y C, LI F M, et al. Plastic film mulch for half growing-season maximized WUE and yield of potato via moisture-temperature improvement in a semi-arid agroecosystem[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104: 68 – 78.

6 谷晓博,李援农,银敏华,等. 降解膜覆盖对油菜根系、产量和水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 184 – 193.

GU Xiaobo, LI Yuannong, YIN Minhua, et al. Effects of biodegradable film mulching on root distribution, yield and water use efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 184 – 193. (in Chinese)

7 严昌荣,梅旭荣,何文清,等.农用地膜残留污染的现状与防治[J].农业工程学报,2006,22(11):269-272.
YAN Changrong, MEI Xurong, HE Wenqing, et al. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 269-272. (in Chinese)

8 李仙岳,彭遵原,史海滨,等.不同类型地膜覆盖对土壤水热与葵花生长的影响[J].农业机械学报,2015,46(2):97-103.
LI Xianyue, PENG Zunyuan, SHI Haibin, et al. Effects of different degradable films mulching on soil water potential, temperature and sunflower growth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 97-103. (in Chinese)

9 王小彬,蔡典雄,刘小秧,等.液膜覆盖对旱地小麦种植体系土壤微生物区系的影响[J].土壤学报,2005,42(4):692-695.
WANG Xiaobin, CAI Dianxiong, LIU Xiaoyang, et al. Effects of surface soil mulch of emulsified bituminous materials on soil microflora in the wheat cultivation system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(4): 692-695. (in Chinese)

10 张洁,姚宇卿,吕军杰,等.液态地膜对土壤物理性状的影响及增产效果[J].土壤通报,2005,36(4):638-640.
ZHANG Jie, YAO Yuqing, LÜ Junjie, et al. Effects of liquid film on crop yield and soil physical behavior[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(4): 638-640. (in Chinese)

11 申丽霞,王璞,张丽丽.可降解地膜对土壤、温度水分及玉米生长发育的影响[J].农业工程学报,2011,27(6):25-30.
SHEN Lixia, WANG Pu, ZHANG Lili. Effects of degradable film on soil temperature, moisture and growth of maize[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 25-30. (in Chinese)

12 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:自然科学版,2003,31(1):1-14.
SHEN Xinlei, HUANG Siguang, WANG Jun, et al. Effects of plastic film mulching models and nitrogen fertilizer on wheat yield and nitrogen efficiency[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2003, 31(1): 1-14. (in Chinese)

13 银敏华,李援农,谷晓博,等.灌水与覆膜对春玉米土壤温度、生育期和水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(4):117-124.
YIN Minhua, LI Yuannong, GU Xiaobo, et al. Effects of irrigation and plastic film mulching on soil temperature, crop growing stages and water use of spring maize[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2015, 33(4): 117-124. (in Chinese)

14 肖光顺,李保成,董承光.揭膜对膜下滴灌早熟陆地棉生理指标的影响[J].中国棉花,2009,36(7):18-19.

15 宿俊吉,宁新柱,林海,等.揭膜对棉田土壤温度、棉花产量及环保的影响[J].西北农业学报,2011,30(3):90-94.
SU Junji, NING Xinzhu, LIN Hai, et al. Effects of uncovering plastic film on soil temperature of cotton cropland, cotton yield and environment protection[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2011, 30(3): 90-94. (in Chinese)

16 AMMALA A, BATEMAN S, DEAN K, et al. An overview of degradable and biodegradable polyolefins[J]. Progress in Polymer Science, 2011, 36(8): 1015-1049.

17 MORENO M M, MORENO A. Effect of different biodegradable and polyethylene mulches on soil properties and production in a tomato crop[J]. Scientia Horticulturae, 2008, 116(3): 256-263.

18 李丽霞,陈海涛.可降解地膜原料大豆秸秆纤维的制备工艺与参数优化[J].农业工程学报,2012,28(13):269-275.
LI Lixia, CHEN Haitao. Preparation technology and parameters optimization for soybean straw fiber as biodegradable film material[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 269-275. (in Chinese)

19 何文清,赵彩霞,刘爽,等.全生物降解膜田间降解特征及其对棉花产量影响[J].中国农业大学学报,2011,16(3):21-27.
HE Wenqing, ZHAO Caixia, LIU Shuang, et al. Study on the degradation of biodegradable plastic mulch film and its effect on the yield of cotton[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(3): 21-27. (in Chinese)

20 韩丽娜,丁静,韩清芳,等.黄土高原区草粮(油)翻耕轮作的土壤水分及作物产量效应[J].农业工程学报,2012,28(24):129-137.
HAN Li'na, DING Jing, HAN Qingfang, et al. Effects of alfalfa-grain (oil) crop plowing rotation on soil moisture and crop yield in Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(24): 129-137. (in Chinese)

21 李援农,刘玉洁,李芳红,等.膜上灌水技术的生态效应研究[J].农业工程学报,2005,21(11):60-63.
Li Yuannong, Liu Yujie, Li Fanghong, et al. Ecological environment effect of irrigation with mulching[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11): 60-63. (in Chinese)

22 韩娟,廖允成,贾志宽,等.半湿润偏旱区沟垄覆盖种植对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J].作物学报,2014,40(1):101-109.
HAN Juan, LIAO Yuncheng, JIA Zhikuan, et al. Effects of ridging with mulching on yield and water use efficiency in winter wheat in semi-humid drought-prone region in China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(1): 101-109. (in Chinese)

23 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.

24 NIU J Y, GAN Y T, ZHANG J W, et al. Postanthesis dry matter accumulation and redistribution in spring wheat mulched with plastic film[J]. Crop Sciences, 1998, 38(6): 1562-1568.

25 银敏华,李援农,李昊,等.垄覆黑膜沟覆秸秆促进夏玉米生长及养分吸收[J].农业工程学报,2015,31(22):122-130.
YIN Minhua, LI Yuannong, LI Hao, et al. Ridge-furrow planting with black film mulching over ridge and corn straw mulching over furrow enhancing summer maize's growth and nutrient absorption[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 122-130. (in Chinese)

DENG Y J, LI C H, JIANG X M, et al. Recent progress of dielectric barrier discharge in atomic spectrometric analysis[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2015(9): 1278 – 1284. (in Chinese)

95 JIANG X M, CHEN Y, ZHENG C B, et al. Electrothermal vaporization for universal liquid sample introduction to dielectric barrier discharge microplasma for portable atomic emission spectrometry[J]. Analytical Chemistry, 2014, 86(11): 5220 – 5224.

96 ZHU Z L, LIU Z F, ZHENG H T, et al. Non-chromatographic determination of inorganic and total mercury by atomic absorption spectrometry based on a dielectric barrier discharge atomizer[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2010, 25(5): 697 – 703.

97 KUERMAITI B, WANG J, HAN G J, et al. Determination of tellurium by atomic fluorescence spectrometry based on dielectric barrier discharge atomizer[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2010, 38(3): 357 – 361.

98 杨萌, 薛蛟, 李铭, 等. 低温等离子体原子荧光光谱法直接测定固体样品中的汞[J]. 分析化学, 2012(8): 1164 – 1168.

YANG M, XUE J, LI M, et al. Direct determination of mercury in solid samples by low temperate plasma coupled with atomic fluorescence spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2012(8): 1164 – 1168. (in Chinese)

99 WU X, YANG W, LIU M, et al. Vapor generation in dielectric barrier discharge for sensitive detection of mercury by inductively coupled plasma optical emission spectrometry[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2011, 26(6): 1204 – 1209.

100 ZHU Z, HE H, HE D, et al. Evaluation of a new dielectric barrier discharge excitation source for the determination of arsenic with atomic emission spectrometry[J]. Talanta, 2014, 122: 234 – 239.

101 CAI Y, LI S H, DOU S, et al. Metal carbonyl vapor generation coupled with dielectric barrier discharge to avoid plasma quench for optical emission spectrometry[J]. Analytical Chemistry, 2015, 87(2): 1366 – 1372.

102 JIANG X, CHEN Y, ZHENG C, et al. Electrothermal vaporization for universal liquid sample introduction to dielectric barrier discharge microplasma for portable atomic emission spectrometry[J]. Analytical Chemistry, 2014, 86(11): 5220 – 5224.

103 TOMBRINK S, MÜLLER S, HEMING R, et al. Liquid analysis dielectric capillary barrier discharge[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2010, 397(7): 2917 – 2922.

104 MAO X F, LIU J X, HUANG Y T, et al. Assessment of homogeneity and minimum sample mass for cadmium analysis in powdered certified reference materials and real rice samples by solid sampling electrothermal vaporization atomic fluorescence spectrometry[J]. Journal of Agricultural Food Chemistry, 2013, 61(4): 848 – 853.

105 ZHANG Y, MAO X F, WANG M, et al. Direct determination of cadmium in grain by solid sampling electrothermal vaporization atomic fluorescence spectrometry with a tungsten coil trap[J]. Analytical Letters, 2015, 48(18): 2908 – 2920.

(上接第 135 页)

26 任小龙, 贾志宽, 陈小莉, 等. 模拟降雨量条件下沟垄集雨种植对土壤养分分布及夏玉米根系生长的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 94 – 99.

REN Xiaolong, JIA Zhikuan, CHEN Xiaoli, et al. Effect of ridge and furrow planting of rainfall harvesting on soil available nutrient distribution and root growth of summer corn under simulated rainfall conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(12): 94 – 99. (in Chinese)

27 宋秋华, 李凤民, 王俊, 等. 覆膜对春小麦农田微生物数量和土壤养分的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(12): 2125 – 2132.

SONG Qiuhua, LI Fengmin, WANG Jun, et al. Effect of various mulching durations with plastic film on soil microbial quantity and plant nutrients of spring wheat field in semi-arid loess plateau of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(12): 2125 – 2132. (in Chinese)

28 张冬梅, 池宝亮, 黄学芳, 等. 地膜覆盖导致旱地玉米减产的负面影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 99 – 102.

ZHANG Dongmei, CHI Baoliang, HUANG Xuefang, et al. Analysis of adverse effects on maize yield decrease resulted from plastic film mulching in dryland[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 99 – 102. (in Chinese)

29 贺润喜, 王玉国, 赵金鱼. 不同生育期揭膜对旱地地膜覆盖玉米生理性状和产量的影响[J]. 山西农业大学学报, 1999, 19(1): 16 – 18, 28.

30 方日尧, 同延安, 梁东丽. 渭北旱塬不同覆盖对冬小麦生产综合效应研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 72 – 75.

FANG Riyao, TONG Yan'an, LIANG Dongli. Comprehensive effects of different mulching materials on winter wheat productions in Weibei highland[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 72 – 75. (in Chinese)

31 陈玉章, 柴守玺, 范颖丹, 等. 覆盖模式对旱地冬小麦土壤温度和产量的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(4): 403 – 409.

CHEN Yuzhang, CHAI Shouxi, FANG Yingdan, et al. Effects of mulching models on soil temperature and yield of winter wheat in rainfed area[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(4): 403 – 409. (in Chinese)