

DOI: 10.5846/stxb201403050373

程宏波, 柴守玺, 陈玉章, 范颖丹, 黄彩霞, 常磊, 杨长刚. 西北旱地春小麦不同覆盖措施的温度和产量效应. 生态学报, 2015, 35(19): - .
Cheng H B, Chai S X, Chen Y Z, Fan Y D, Huang C X, Chang L, Yang C G. Effect of mulching method on soil temperature and grain yield of spring wheat in rainfed agricultural areas of northwestern China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): - .

西北旱地春小麦不同覆盖措施的温度和产量效应

程宏波¹, 柴守玺^{2,*}, 陈玉章², 范颖丹², 黄彩霞³, 常磊², 杨长刚²

1 甘肃农业大学生命科学与技术学院 干旱生境国家重点实验室, 兰州 730070

2 甘肃农业大学农学院 干旱生境国家重点实验室, 兰州 730070

3 甘肃农业大学工学院 干旱生境国家重点实验室, 兰州 730070

摘要:在西北半干旱雨养条件下,以春小麦为材料,研究了夏季覆膜(T_1)、秋季覆膜(T_2)、春季覆膜(T_3)、小麦碎秆覆盖(T_4)、小麦整秆覆盖(T_5)、夏季覆膜+麦秆还田(T_6)和无覆盖对照(CK)7个处理间0—20 cm土壤温度、产量和重要农艺指标的差异。结果表明:处理间在不同生育时期、不同土层的土壤温度存在显著差异。生育时期比较,处理间土壤温度差异以播种期—分蘖期最大、蜡熟期—成熟期次之、拔节期—灌浆中期较小;土层间比较,处理间土壤5 cm处的温度差异依次大于10 cm、15 cm、20 cm处。 T_6 在各时期、各土层均表现出突出的增温效应,全生育期土壤平均温度较CK高0.57℃,以成熟期、播种期及分蘖期增温效果较大;其它覆盖处理存在增温和降温的双重效应,增温效应覆膜>秸秆覆盖,而降温效应则秸秆覆盖>覆膜,各处理的32个土壤温度测试点中,增温点次以 T_4 最少(仅有9个),降温点次为23个,且 T_4 降温幅度最大,全生育期0—20 cm土壤平均温度较CK低0.63℃,降温效果在播种期和分蘖期尤为突出。覆盖处理全生育期土壤平均温度表现为覆膜>CK>秸秆覆盖。温差最高值出现在分蘖期土壤5 cm处的 T_6 与 T_4 间, T_6 高出 T_4 4.23℃。 T_6 可以平抑生育期间土壤温度的变化,其它5个覆盖处理则加剧土壤温度的波动,以 T_4 处理的土壤温度波动最明显(CV为32.4%)。处理间产量、单位面积穗数、穗粒数间差异显著,而千粒重差异不显著。无论覆膜还是秸秆覆盖,都较CK穗粒数显著增加(17.4%—36.3%)。除 T_3 较CK显著减产14.1%外,其它覆盖处理均较CK显著增产21.7%—37.3%,其中以全膜覆土穴播基础上的秋季覆膜(T_2)增产最显著,适宜在西北旱地春小麦产区推广应用。土壤温度主要影响营养生长,拔节—开花期0—20 cm的土壤温度与株高高度正相关(0.77^* — 0.92^{**}),但覆盖引起土壤温度的变化最终对西北旱地春小麦产量没有关键影响。

关键词:雨养农业区;春小麦;地膜覆盖;秸秆覆盖;土壤温度;西北

Effect of mulching method on soil temperature and grain yield of spring wheat in rainfed agricultural areas of northwestern China

CHENG Hongbo¹, CHAI Shouxi^{2,*}, CHEN Yuzhang², FAN Yingdan², HUANG Caixia³, CHANG Lei², YANG Changgang²

1 College of Bioscience and Technology, Gansu Provincial Key Lab of Aridland Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2 College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

3 College of Engineering, Lanzhou 730070, China

Abstract: This study determined the effects of mulching method on soil temperatures in the 0—20 cm soil layer, and grain yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) in a semiarid rainfed agricultural area of northwestern China. The experiment was conducted at Tongwei Research Station, Gansu Agricultural University (34°55'N, 104°57'E) in 2012. The following 7 treatments were evaluated: plastic film mulch applied in summer (T_1), plastic film mulch applied in autumn (T_2),

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(20130314);现代农业产业技术体系建设专项(CARS-3-2-49)

收稿日期:2014-03-05; 网络出版日期:2014-12-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sxchai@126.com

plastic film mulch applied in spring (T_3), mulching with chopped wheat straw (5-cm in length) on the soil surface in summer (T_4), mulching with whole wheat straw in summer (T_5), T_1 in combination with harvested wheat straw returned to the field (T_6), and control (no mulching, CK). Soil temperatures were measured and recorded at 32 points in each treatment. Soil temperatures differed significantly among mulching treatments, growth stages and soil layers. The largest difference in soil temperature occurred from the sowing to tillering period, followed by the dough stage to maturation period, whereas the smallest differences in soil temperature were in the jointing-middle filling stage. Soil temperature decreased with soil depth in the order 5 cm > 10 cm > 15 cm > 20 cm. Soil temperature in the T_6 plots was significantly ($0.57\text{ }^{\circ}\text{C}$) higher than, and this effect was more pronounced in the sowing, tillering, and maturing stages than in the other growth stages. The other five treatments either increased or decreased soil temperatures depending on growth stage and soil layer. Soil temperature was consistently increased by plastic film mulch but consistently decreased by straw mulching. The T_4 treatment had 9 points with soil temperatures higher than the CK, and 23 points lower than the CK. Mean soil temperature over the whole growth period was $0.63\text{ }^{\circ}\text{C}$ lower in the T_4 treatment than in the CK, with the difference being more obvious at the time of sowing and the tillering stage. Average soil temperatures over the whole growth period were in the order: plastic film mulch > CK > straw mulching. The highest difference occurred between T_6 and T_4 in the 5-cm soil layer at the tillering stage, with T_6 being $4.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ higher than T_4 . The largest variation soil temperature among growth stages was found in the T_4 treatment, with a coefficient of variation of 32.4%. Mulching increased the number of kernels per spike by 17.4% to 36.3% compared with the CK. Mulching increased wheat grain yield by 21.7% to 37.3% compared to the CK, with the maximum yield increase being with plastic film mulch applied in the autumn (T_2). The exception was the T_5 treatment which decreased grain yield by 14.1% compared to the CK. It appears that the T_2 mulching method is the most suitable for spring wheat production in rainfed agricultural regions of northwestern China. There were highly positive correlations ($r = 0.77\text{--}0.92^{**}$) between soil temperature and plant height at jointing-flowering, but mulching method did not have a significant impact on spring wheat grain yield in the study area.

Key Words: Rainfed area; Spring wheat; Plastic mulch; Straw mulching; Soil temperature; Northwestern China.

覆盖栽培是西北旱作农业的关键技术,包括地膜覆盖和秸秆覆盖两种。保墒和调节土壤温度是覆盖最明显的效应,但以往人们更关注覆盖的保墒效应,而对覆盖温度效应的研究重视不够,尤其在西北旱地春小麦上关于覆盖温度效应方面的研究报道很少。在西北积温不足的旱作区,覆盖的温度效应有时具有特殊重要的生态生产意义,甚至直接影响覆盖技术成败或适用范围。保墒与增温通常被认为是西北旱作区地膜覆盖能大幅度增产的主要原因。近年甘肃省成功推广全膜双垄沟旱地地膜玉米栽培新技术 80 万公顷,不仅能普遍大幅度增产,而且由于覆膜增温效应,可将玉米种植带扩展到海拔 2000 m 以上的寒旱区。不少研究表明,地膜覆盖可明显提高地温^[1-5],冬小麦覆膜一般提高苗期 0—10 cm 地温 1—2 $^{\circ}\text{C}$,可促进早熟,弥补冬前积温不足,降低越冬死亡率^[6-7],延长穗分化时间和增加小穗数^[8],增产 30% 以上^[9-10]。而秸秆覆盖由于明显降低地温^[11-16],进而会导致小麦^[11,17-18]、玉米^[12,15,19]出苗率降低,生育延迟,营养生长受到抑制,有时造成严重减产。

但随着研究的深入,发现覆盖的温度效应远比人们想象的要复杂得多。在小麦、棉花、玉米、大豆等作物上发现,无论地膜覆盖还是秸秆覆盖,与无覆盖相比,都会出现前期低温季节增温、后期高温季节降温的双重效应^[8,17-18,20-25],并能平抑地温在季节间和昼夜间的剧烈变化^[8,26],这种双重效应被认为也是覆盖增产的重要机制^[17]。不少研究表明,覆盖对土壤温度的影响因覆盖材料^[1-2,27]、覆盖方式与时期^[3-6]、土壤层次^[7]、作物种类、当地气候条件和作物生长季节等的不同也有很大差异^[8-10,28]。但覆盖引起的地温变化是否有利或不利于作物生长及高产、或对其有无明显影响,也视具体情况而定,不能一概而论。例如, Hari 等^[14]在印度西北部同样对小麦和玉米秸秆覆盖研究表明,麦秆覆盖后虽然地温始终低于未覆盖,其中播种层低 $2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,但最终仍显著提高了产量和水分利用率。覆膜虽能普遍增产,但有时覆膜增温可能会导致小麦后期早衰和粒重

下降^[29]。在玉米上也发现由于覆膜增温生育期明显提前,抽雄前后常易遭受严重伏旱而减产,有时减产达 70%^[30]。不同覆盖方式间土壤温度差异也很大。山西在旱地冬小麦上测定^[31],全地面覆膜平作穴播较垄膜沟播(又称膜侧条播)全生育期 15 cm 处地温高出 0.98 °C,积温增加 233 °C,但二者的幼穗分化期长短及进程、穗粒数、千粒重都差异不大,地温差异似乎与产量高低关系不大。我们在旱地春小麦研究发现^[21],春季覆膜和秋季覆膜地温差异不大,但膜上覆土与不覆土两种方式间差异较大,全生育期 0—25 cm 平均地温覆土较不覆土低 1.57 °C,但产量高 24.4%,覆土高产原因主要是提高了穗粒数,而千粒重相差不大,穗粒数增多显然与低温有利于延长穗分化期有关;研究同时发现覆膜增温效果土壤下层大于上层,早晨依次大于傍晚和中午。

西北旱地春小麦主要分布在甘肃、宁夏、青海,在生态区划上属西北春播春性麦区,该区域积温不足、一年一熟、早寒同驻、内陆性气候强烈,旱地春小麦是当地雨养区少数可适宜种植的主要作物。但春小麦播种后气温一直处于持续提高状态,又常遭遇春末夏初干旱,水热互作明显,产量低而不稳,覆盖种植是当地春小麦抗旱增产、稳产的主要途径。为了实现有限降水的高效蓄保和提高降水生产效率,各地近年通过积极探索改进,提出了一些小麦覆盖栽培新技术,包括在全膜覆土穴播新技术基础上的不同季节覆盖技术,为了避免地膜污染和节省成本、实现用养结合和水肥互调而提出的各种秸秆覆盖技术,以及地膜覆盖与秸秆还田结合技术等。这些研发改进的新技术大多具有程度不等的保墒增产效果,但对地温的影响、以及地温变化对生长发育和产量形成的影响如何,尚缺乏较全面深入的研究。西北旱地春小麦分布区的生态生产条件、以及该作物本身具有一定的特殊性,如前所述,覆盖的温度效应又随覆盖技术、作物种类、时空环境等的不同差异很大,已有在其它作物和环境下的研究结果只能借鉴,究其上述新型覆盖技术在西北旱地春小麦上的温度效应以及温度对产量影响如何,还需通过当地具体试验研究才能确定。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

试验于 2012 年 3 月—2012 年 7 月在西北旱地春小麦代表区甘肃省通渭县甘肃农业大学试验基地进行。试验基地属温带半干旱气候带,土壤为黄绵土,海拔 1590 m,年日照时数 2100 h—2430 h,年均气温 7.4 °C,无霜期 120 d—170 d,年蒸发量>1500 mm,年均降水量 444.2 mm。试验年度小麦生育期(3 月—7 月)总降水量 471 mm,其中≥5 mm 的有效降水 350.0 mm。

1.2 试验设计

春小麦供试品种为西早 2 号,地膜采用幅宽 120 cm、厚度 0.008 mm 高强度地膜。试验共设七个处理,其中地膜覆盖处理 4 个(T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_6),秸秆覆盖处理 2 个(T_4 、 T_5),以无覆盖露地种植为对照(CK)。小区面积 31.9 m²(5.8 m×5.5 m),三次重复,随机区组。各处理如下:

夏季覆膜(T_1):采取全膜覆土穴播方式。夏茬收获后立即灭茬整地,夏季全地面平作覆膜、膜面覆土 1 cm,秋季穴播。

秋季覆膜(T_2):秋季覆膜,其余同 T_1 。

春季覆膜(T_3):春季播前覆膜,其余同 T_1 。

小麦碎秆夏季覆盖(T_4):夏季将秸秆粉碎成 5 cm 左右,均匀覆盖于小区中,覆盖厚度以不见裸地为宜,覆盖量为风干重 3540 kg/hm²。播种时把秸秆豁开开沟,种子均匀播洒于沟内,然后覆土并盖回秸秆。

小麦整秆夏季覆盖(T_5):夏季将小麦整秆均匀覆盖于小区中,覆盖量和开沟播种方法同 T_4 。

夏季覆膜+麦秸还田(T_6):将小麦秸秆粉碎成 5 cm 左右,夏季将秸秆旋耕还田后随即覆膜,秸秆还田量为风干重 4500 kg/hm²,覆膜方式同 T_1 。

对照(CK):不覆膜,平作,穴播。

夏季地膜覆盖及秸秆覆盖的时间为 2011 年 8 月 10 日,秋季覆膜时间为同年 10 月 2 日,春季覆膜时间为 2012 年 3 月 12 日,播种期为 2012 年 3 月 20 日。各处理播种量和施肥量相同。播量按 187.5 kg/hm² 下种,每

小区种 29 行,行距 20 cm。穴播小区穴距 12 cm,每穴 8 粒,条播小区每行播量 21.2 g。播前施优质农家肥 45 t/hm²,纯氮和 P₂O₅各 120 kg/hm²,所有肥料在夏季结合灭茬一次性旋耕施入。生育时期不再追肥,灌浆后期进行“一喷三防”。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤温度测定

各生育时期各小区分 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 四个土层分别测定,地温计埋入各小区中间行间,全生育期均在固定地方读取地温。各生育时期测定时,均选在干燥晴天进行,分别在早晨(6:00—8:00)、中午(12:00—14:00)和傍晚(17:00—18:30)分三次测定,日均温取早、中、晚三次测定平均值。

1.3.2 土壤含水量测定

各生育时期各小区取 0—20 cm 土层土样采用烘干法测定土壤含水量。土壤含水量=(土壤鲜质量-烘干土质量)/烘干土质量×100%。

1.3.3 农艺指标的测定

各生育时期采用烘干法测定植株含水量,在开花期测定单株干重,取样方法均为各小区随机选小麦 20 株。苗期每小区选 3 点测定单位面积穗数、基本苗。成熟时每小区全部实收、单独脱粒计产,同时每小区随机取 20 株室内测定穗粒数、千粒重、株高等农艺指标。

1.4 数据处理

数据用 Excel 作图,用 SPSS16.0 软件进行统计分析。

2 结果分析

2.1 土壤温度的时空动态差异

图 1 直观反映了不同时期和土层土壤温度的时空变化及差异。各处理的土壤绝对温度(日均温)一致表现为:随着土层加深而降低,随着生育时期的推进而升高。处理间在各时期、各土层都存在显著($P>0.05$)和不显著($P<0.05$)的差异,但处理间差异幅度因时期、土层的不同有较大差别。从时期上比较,处理间的差异以前期(播种期—分蘖期)最明显且达到显著水平($P>0.05$)、后期(蜡熟期—完熟期)次之、中期(拔节期—灌浆中期)较小;土层间比较,上层大于下层。比较不同时期 0—20 cm 平均温度(图 2)和各土层全生育期平均温度(图 3),也可明显看出上述随不同时期和土层的温度变化趋势和处理间差异趋势。夏季覆膜+麦秸还田处理(T₆)和小麦碎秆覆盖(T₄)无论各时期平均温度、还是各土层平均温度,均与其它处理有显著差异($P>0.05$)。

处理间温度极差最高值出现在分蘖期土壤 5cm 处的 T₆与 T₄间,T₆高出 T₄4.23 ℃,最小值出现在拔节期土壤 15 cm 处的 T₂与 T₃间(0.33 ℃);各时期 0—20 cm 的平均极差为:前期 2.70 ℃—2.88 ℃、中期 0.35 ℃—0.76 ℃、后期 1.00 ℃—1.99 ℃,各土层全生育期的平均极差依次为 5 cm(1.75 ℃)>10 cm(1.52 ℃)>15 cm(1.38 ℃)>20 cm(1.28 ℃)。处理间变异系数(Coefficient of variation, CV)前期 7.54%—11.92%,中期 0.77%—1.14%,后期 1.55%—3.43%,各时期 CV 和极差趋势一致,但各土层处理间 CV 大小相近(3.79%—4.05%)。

从图 1 明显可见,覆膜处理的温度一般高于秸秆覆盖处理。夏覆膜+麦秸还田处理(T₆)在大多情况都处于最高或较高状态,而小麦碎秆覆盖(T₄)在大多情况下处于最低或较低状态。

与无覆盖的 CK 相比,T₆在各时期、各土层表现出突出的增温效应,而其它覆盖处理都不同程度地存在增温和降温的双重效应,增温效应覆膜>秸秆覆盖,而降温效应则秸秆覆盖>覆膜,以碎秆覆盖(T₄)降温最明显。

统计图 1 中覆盖较 CK 增温点次比例,在覆盖处理共 192 个测定点次中,有 54.7%的点次高于 CK,相应 45.3%点次低于 CK。但处理间相差较大,各处理较 CK 增温点次比例依次为:T₆(96.9%)>T₃(68.7%)>T₅(53.1%)>T₁(46.9%)>T₂(43.8%)>T₄(28.8%)。比较增温和降温幅度,各处理全生育期 0—20 cm 土壤平均温度与 CK 的差值依次为:T₆(0.57 ℃)>T₃(0.21 ℃)>T₂(-0.05 ℃)>T₁(-0.07 ℃)>T₅(-0.25 ℃)>T₄

($-0.63\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

全生育期 0—20 cm 土壤平均温度 CK 与 T_6 、 T_3 、 T_5 、 T_4 间分别存在显著差异 ($P<0.05$), 春季覆膜显著高于秋季覆膜和夏季覆膜, 整秆覆盖明显高于碎秆覆盖。平均来看, 覆膜 ($19.68\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ CK ($19.51\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 秸秆覆盖 ($19.07\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

比较各时期 0—20 cm 土壤平均温度 (图 2), 覆膜平均与 CK 的差值各时期依次为: 成熟期 ($1.14\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 孕穗期和播种期 ($0.30\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 拔节期 ($0.21\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 开花期 ($0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 灌浆中期 ($-0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 蜡熟期 ($-0.14\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 分蘖期 ($-1.00\text{ }^{\circ}\text{C}$); 而秸秆覆盖平均与 CK 的差值各时期依次为: 蜡熟期 ($0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 拔节期 ($0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 成熟期 ($-0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 孕穗期 ($-0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 开花期 ($-0.19\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 灌浆中期 ($-0.28\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 播种期 ($-1.54\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 分蘖期 ($-1.73\text{ }^{\circ}\text{C}$)。由上述差值可见, 覆膜的增温效应以成熟期最大, 而秸秆覆盖降温效应以前期 (播种—分蘖期) 最明显。需要强调的是: 在拔节—孕穗期营养生长旺盛阶段, 覆膜较 CK 的明显增温有利于促进营养生长, 秸秆覆盖虽然有普遍降温效应, 但该阶段秸秆覆盖与 CK 地温相差很小, 不会造成对营养生长的明显抑制。

在开花—灌浆中期的气温较高季节, 秸秆覆盖的明显降温效应显然有利于减轻高温胁迫和促进籽粒灌浆, 覆膜虽然前期有明显增温效应, 但在该阶段也与 CK 相近, 不会明显抑制籽粒形成和灌浆。小麦粒重在蜡熟期达到最大且灌浆结束, 因此成熟期的温度差异意义不大。

比较全生育期各土层平均温度 (图 3), 覆膜增温效应和秸秆覆盖降温效应都以土壤 5 cm 处最明显。覆膜—CK 差值各土层依次为: 5 cm ($0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 10 cm ($0.29\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 15 cm ($0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 20 cm ($-0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$), 而秸秆覆盖—CK 差值各土层依次为: 10 cm 和 20 cm ($-0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 15 cm ($-0.42\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 5 cm ($-0.61\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

T_6 和 T_4 不仅具有全面突出的增温和降温效应, 而且在增温和降温的时空表现上有一定特殊性。 T_6 与其他三种覆膜处理 (T_1 、 T_2 、 T_3) 相比, 除在成熟期增温最明显外 ($1.86\text{ }^{\circ}\text{C}$), 播种期 ($0.87\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和分蘖期 ($0.59\text{ }^{\circ}\text{C}$) 增温幅度也明显高于其他时期 ($0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$), 在土层上则以 10 cm 处增温幅度最大, T_6 —CK 差值各土层依次为: 10 cm ($0.72\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 5 cm ($0.68\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 15 cm ($0.47\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 20 cm ($0.40\text{ }^{\circ}\text{C}$); T_4 与 T_5 相比, T_4 降温幅度分蘖期 $>$ 播种期, 而 T_5 相反, T_4 —CK 差值各时期依次为: 蜡熟期 ($0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 拔节期 ($0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 成熟期 ($-0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 孕穗期 ($-0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 开花期 ($-0.24\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 灌浆中期 ($-0.41\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 播种期 ($-1.83\text{ }^{\circ}\text{C}$) $>$ 分蘖期 ($-2.29\text{ }^{\circ}\text{C}$); 土层间比较, T_4 与 T_5 虽然都以 5 cm 处降温幅度最大, 分别为 $-0.78\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-0.43\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但 T_4 在其它三个土层降温幅度相近 ($-0.55\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $-0.60\text{ }^{\circ}\text{C}$), 而 T_5 在 10 cm ($-0.21\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和 15 cm ($-0.24\text{ }^{\circ}\text{C}$) 处的降温幅度高出 20 cm 处一倍以上 ($-0.11\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

各处理 0—20 cm 土壤平均温度在不同生育时期的变异系数依次为: T_4 (32.4%) $>$ T_5 (30.7%) $>$ T_2 (29.9%) $>$ T_1 (29.3%) $>$ T_3 (29.0%) $>$ CK (27.5%) $>$ T_6 (26.8%), 可见除 T_6 外, 其它 5 个覆盖处理较 CK 明显加剧了生育期间温度的波动, 以秸秆覆盖的温度波动幅度最大, 而 T_6 可平抑温度的剧烈变化。

作物生长发育是一个循序渐进的过程, 因此温度对生长发育的影响实际上主要反映的是有效积温影响。以往对小麦生长与气温关系研究表明, 主茎每出生一片叶, 约需有效积温 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ [32], 相应地可长出 1 条 (个) 以上的次生根和分蘖, 前期根、茎、叶的出生数量和出生早晚对营养生长量会产生重要影响。本试验期间, 春小麦全生育期土壤平均温度每相差 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 土壤有效积温相差 $124\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。 T_6 和 T_4 全生育期 0—20 cm 土壤平均温度虽然与 CK 分别仅相差 $0.57\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-0.63\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但全生育期有效积温 ($\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) 相差甚大, T_6 和 T_4 与 CK 分别相差 $70.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-78.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_6 和 T_4 间相差高达 $148.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。有效积温的差异主要在前期, T_6 和 T_4 在播种—拔节的苗期阶段土壤有效积温相差 $122.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 占到全生育期有效积温总差异的 82%。

2.2 土壤温度的日变化差异

图 4 反映了早、中、晚全生育期平均温度差异及变化, 各处理一致表现为: 早晨随着土层加深、温度越高, 中午和傍晚则相反。处理间的差异傍晚 $>$ 中午 $>$ 早晨、上层大于下层。处理间变异系数早、中、晚分别为: 1.3%、2.1%、2.6%, 土层间依次为: 5 cm (2.4%) $>$ 10 cm (2.0%) $>$ 15 cm (1.9%) $>$ 20 cm (1.8%)。与 CK 相比, 覆膜的增温幅度和秸秆覆盖的降温幅度平均以傍晚和土壤 5 cm 处最明显。

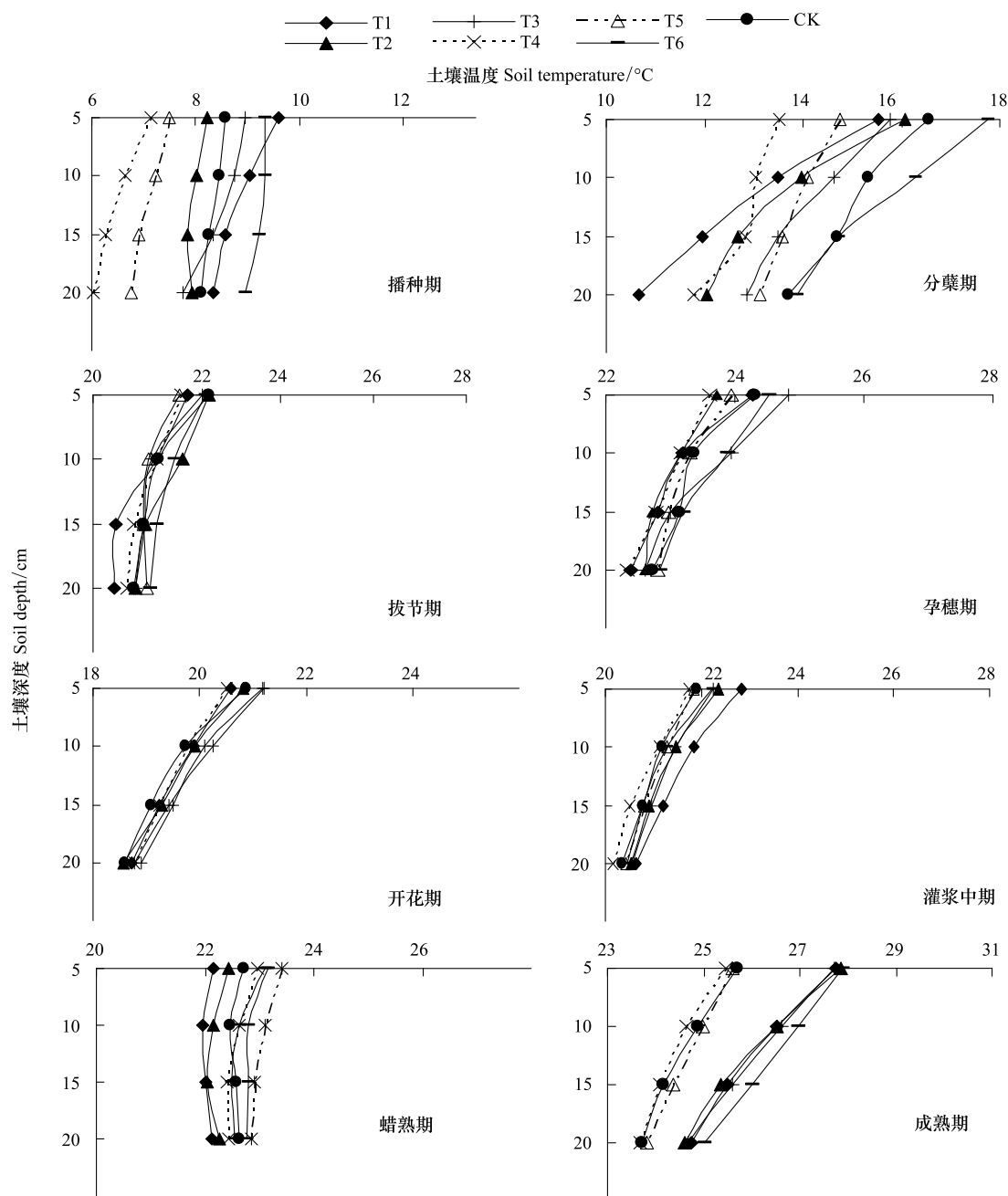


图1 各生育期各土层温度的时空变化 (°C)

Fig.1 The temporal and spatial differences of soil temperature on different growth stages and soil layers treatments (°C)

T₁: 夏季覆膜 Mulching plastic film applied in the summer; T₂: 秋季覆膜 Mulching plastic film applied in the autumn; T₃: 春季覆盖 Mulching plastic film applied in the spring; T₄: 小麦秸秆覆盖 Mulching 5 cm length wheat straw in summer; T₅: 小麦整秆覆盖 Mulching whole wheat straw in summer; T₆: 夏季覆膜+麦秆还田 The combination T₁ to field-returned wheat straw; CK: 无覆盖对照 Un-mulched control. a: 播种期 Sowing date; b: 分蘖期 Tillering stage; c: 拔节期 Jointing stage; d: 孕穗期 Booting stage; e: 开花期 Flowering stage; f: 灌浆中期 Middle filling stage; g: 蜡熟期 Dough stage; h: 成熟期 Mature stage

覆膜的增温效应主要出现在早晨和傍晚,在中午各土层覆膜(除 T₆外)也出现普遍降温现象,但两种秸秆覆盖在早、中、晚各土层一致表现为降温效应。需要强调的是, T₆在早、中、晚各土层都高于 CK 和其他处理,而 T₄则都低于 CK 和其他处理,分别表现全面、明显的增温和降温效应。

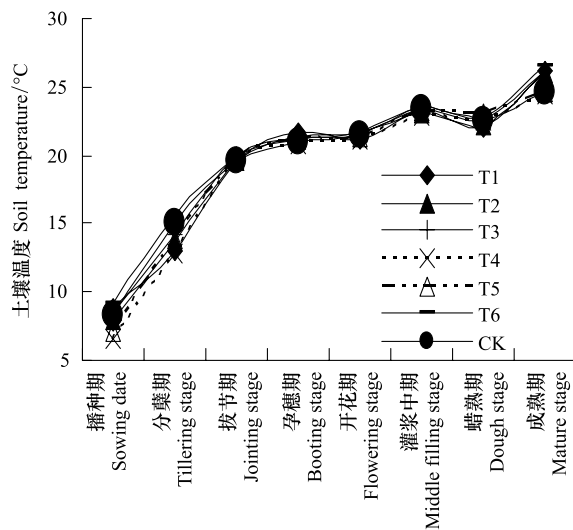


图2 各生育时期土壤平均温度动态变化

Fig.2 The change of soil temperature with growth stages

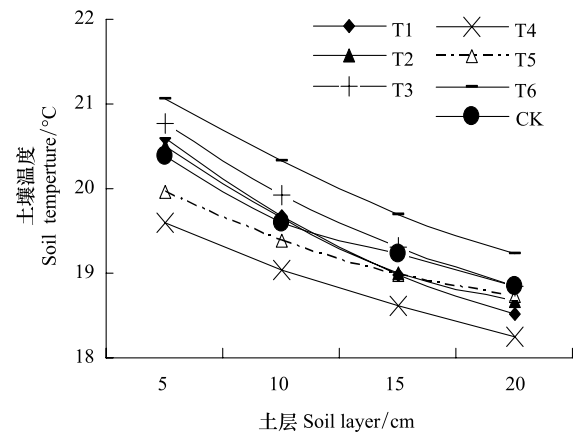


图3 各土层全生育期土壤平均温度

Fig.3 The mean temperature in the different soil layers during the whole growth period of spring wheat

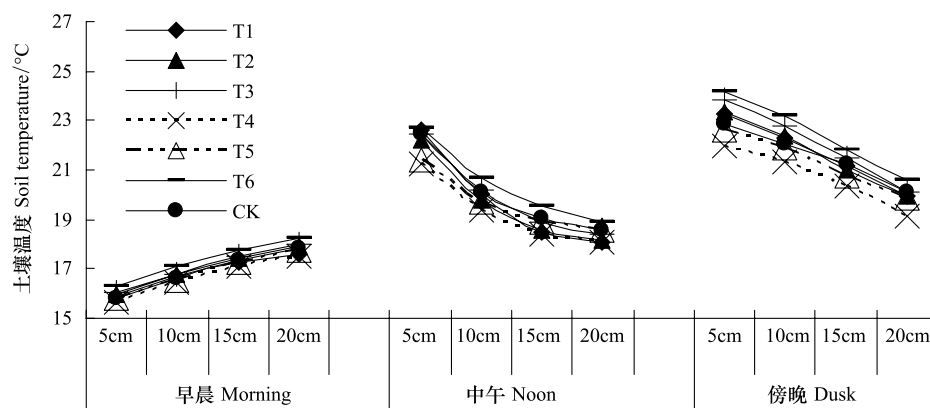


图4 不同土层温度平均日变化

Fig.4 Average diurnal changes of soil temperature(°C) in various soil layers across the whole growth period

2.3 产量及主要农艺指标差异

从表1可见,处理间产量存在显著差异。除小麦整秆夏季覆盖(T_5)较无覆盖对照(CK)显著减产14.1%外,其它覆盖处理均较CK显著增产,以秋季覆膜(T_2)增产幅度最大(37.3%)、小麦碎秆夏季覆盖(T_4)增产幅度最小(21.7%)。覆膜处理间比较,夏季覆膜(T_1)和秋季覆膜(T_2)的产量显著高于春季覆膜(T_3),但夏季覆膜+麦秸还田(T_6)和夏季覆膜(T_1)间产量差异不显著,表明短期秸秆还田没有显著增产效应。

比较产量三要素差异,处理间单位面积穗数、穗粒数差异显著,而千粒重差异不显著,表明覆盖与否对粒重无明显影响;单位面积穗数以产量最高的秋季覆膜(T_2)最高、较CK显著增加15.7%, T_2 的单位面积穗数也显著高于 T_1 、 T_4 、 T_6 。以产量最低的小麦整秆夏季覆盖(T_5)最低,较CK显著降低15.7%。

覆盖可显著提高穗粒数,无论覆膜还是秸秆覆盖,所有覆盖处理都较CK穗粒数显著增加(17.4%—36.3%),以夏季覆膜+麦秸还田(T_6)和夏季覆膜(T_1)增加穗粒数最明显,分别较CK提高36.3%和30.9%, T_6 和 T_1 较与其它覆盖处理穗粒数也显著增加,表明夏季覆膜更有利于增加穗粒数。

从生长和产量形成角度综合分析各处理产量高低的原因,发现秋季覆膜(T_2)产量最高的原因是产量三要素、营养生长指标(株高和单株生物量)、收获指数维持在一个相对较高和协调的水平;小麦整秆夏季覆盖(T_5)产量最低,主要是单位面积穗数严重不足;无覆盖CK全生育期0—20 cm土壤平均含水量显著低于覆盖

各处理,因此 CK 产量低可能主要受土壤干旱影响,导致穗粒数和单位面积穗数明显较低、营养生长受到明显抑制。

比较处理间变异系数,技术处理对单株营养生长量(DMW)影响最大(35.3%),对单位面积穗数的影响(13.4%)大于穗粒数(9.5%),以千粒重最稳定(2.9%)。

表 1 产量及主要农艺指标
Table 1 Grain yield and main agronomic traits

处理 Treatment	GY/ (kg/hm ²)	YIR/%	SPUA/ (×10 ⁴ ·hm ⁻²)	GPS	TKW/g	PH/cm	DMW/g	HI/%	MT/°C	AMCS/%	MMCS/%	WC/mm
T ₁	3317.7b	30.0	241.0bc	33.9a	46.7a	100.3a	54.8a	41.1d	19.4c	15.7ab	13.8b	416.7e
T ₂	3503.7a	37.3	284.8a	30.4c	46.5a	95.8b	47.3b	43.2bc	19.5c	15.0b	13.4bc	481.6a
T ₃	3161.9cd	23.9	261.5ab	31.3c	44.4a	102.3a	27.1d	42.0cd	19.7b	15.0b	13.0cd	432.8c
T ₄	3105.7d	21.7	235.0bc	32.3b	47.0a	77.9d	23.4e	41.7d	18.9e	15.7ab	13.5bc	428.4d
T ₅	2192.3f	-14.1	180.5d	32.0bc	43.6a	95.6b	28.3d	44.9a	19.3cd	15.8a	14.1b	4431b
T ₆	3284.3bc	28.7	228.3c	35.3a	46.9a	96.1b	39.7c	38.2e	20.1a	16.5a	14.8a	435.9c
CK	2551.7e		246.1bc	25.9d	46.1a	88.1c	24.6e	43.9ab	19.5c	14.5c	13.5bc	418.6e
CV (%)	15.6		13.4	9.5	2.9	8.8	35.3	5.2	1.8	4.3	4.2	5.0

GY:籽粒产量 Grain yield per unit area; YIR:增产率 Yield increasing rate; SPUA:单位面积穗数 Spikes per unit area; GPS:穗粒数 Grains per spike; TKW:千粒重 Thousand kernels weight; WUE:水分利用效率 water use efficiency; PH:株高 Plant height; DMW:开花期单株干重 Dry matter weight per plant at anthesis; MT:全生育期 0—20cm 土壤平均温度 Mean temperature in 0—20cm soil across whole period; AMCS:全生育期 0—20cm 土壤平均含水量 Average moisture content in 0—20cm soil across whole period; MMCS:全生育期 0—200cm 土壤平均含水量 Mean moisture content in 0—200cm soil across whole period; WC:耗水量 Water consumption; CV:变异系数 Coefficient of variation; 同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

2.4 土壤温度与产量及农艺指标相关

拔节期—开花期是春小麦植株开始增高到定长、单株干重进入快速增加到最大的旺盛营养生长阶段,其中株高是反映营养生长状况最可靠和明显的指标。相关分析表明(表 2),株高与孕穗期均温(0.81^{*})、拔节—开花期均温(0.77^{*})、孕穗—开花阶段积温(0.79^{*})、拔节—孕穗期积温(0.92^{**})、拔节—开花期积温(0.91^{**})达到显著或极显著正相关。开花期单株生物量与孕穗期均温也显著正相关(0.84^{*}),表明土壤温度

表 2 土壤温度与农艺指标相关
Table 2 Correlations between soil temperature and agronomic traits

土壤温度指标 Soil temperature index	GY	SPUA	GPS	TKW	WUE	PH	DMW	AWCS
拔节期均温(MJ)	0.24	0.07	0.39	-0.29	0.15	0.55	-0.04	0.31
孕穗期均温(MB)	0.46	0.33	0.28	0.06	0.50	0.81 [*]	0.84 [*]	-0.01
开花期均温(MF)	0.17	0.31	-0.15	0.12	-0.03	0.15	-0.01	-0.04
灌浆中期均温(MMF)	-0.08	-0.07	0.08	-0.30	-0.02	0.53	-0.16	0.11
拔节—开花期均温(MTF)	0.47	0.41	0.22	0.01	0.34	0.77 [*]	0.48	0.08
全生育期均温(MWP)	0.26	0.17	0.22	0.01	0.21	0.64	0.28	0.20
拔节—孕穗期积温(AJB)	0.52	0.29	0.47	-0.08	0.51	0.92 ^{**}	0.67	0.18
孕穗—开花期积温(ABF)	0.54	0.50	0.18	0.10	0.40	0.79 [*]	0.69	-0.01
拔节—开花期积温(AJF)	0.55	0.40	0.36	-0.01	0.48	0.91 ^{**}	0.71	0.10

拔节期均温(MJ): Soil mean temperature in the jointing stage; 孕穗期均温(MB): Soil mean temperature in the booting stage; 开花期均温(MF): Soil mean temperature in the flowering stage; 灌浆中期均温(MMF): Soil mean temperature in the middle filling stage; 拔节—开花期均温(MTF): Soil mean temperature in the booting—flowering stage; 全生育期均温(MWP): Soil mean temperature across the whole growth period; 拔节—孕穗期积温(AJB): Soil accumulated temperature in the jointing—booting stage; 孕穗—开花期积温(ABF): Cumulated soil temperature in the booting—flowering stage; 拔节—开花期积温(AJF): Soil accumulated temperature in the jointing—flowering stage; ^{*} 在 0.05 水平上显著相关; ^{**} 在 0.01 水平上显著相关

的高低直接影响营养生长量的大小。但从表 2 可见,土壤温度指标与产量及产量三因素相关不显著($-0.07—0.55$)。各时期和全生育期平均地温和土壤含水量间也相关不显著($-0.06—0.57$)(表略)。

无论 0—20 cm 耕层、还是 0—200 cm 土壤水库的全生育期平均含水量,产量最高的处理不一定含水量最高(见表 1)。相关分析也表明(表略),产量与 0—20 cm、0—200 cm 全生育期平均含水量均无显著相关,但这并不意味着产量与土壤水分没有关系。产量与土壤墒情无显著相关的原因主要是由覆盖条件下耗水结构的改变引起的。农田耗水包括植株蒸腾和棵间土壤蒸发,后者约占麦田耗水 30%—40%^[33],覆盖阻隔了棵间土壤水分蒸发,无疑具有保墒效应,尤其是全地面覆膜几乎阻隔了所有棵间土壤蒸发。从表 1 可见,全生育期耗水量覆膜与无覆盖 CK 相近,覆膜平均较 CK 仅多 5.5%,而产量覆膜平均较 CK 高达 30.0%,由此可见,覆盖增产的原因主要是提高了蒸腾/蒸发比例,使得耗水主要用于植株蒸腾性生产,从而提高了水分生产效率和籽粒产量。

3 讨论

本研究表明,春小麦 0—20 cm 土层全生育期平均温度覆膜高于秸秆覆盖,这与前人在冬小麦^[8,34]、玉米^[35]、青葱^[36]上的研究结果一致。随着生育时期和土层不同,覆膜和秸秆覆盖都不同程度的出现较无覆盖对照增温和降温的双重效应,这也与在冬小麦^[34]、玉米^[22,24,37]及棉花^[23]等作物上的研究结论类似。同时本研究发现,春小麦秸秆覆盖较无覆盖生育期间的土壤温度波动更剧烈,而刘炜^[26]在冬小麦秸秆覆盖温度效应研究上得出了相反结论,这可能与冬、春小麦的生长季节不同、进而导致覆盖对热量传导和温度变化的影响不同有关。

夏季覆膜+麦秸还田处理(T_6)具有突出、全面的增温效应,且在同样夏季覆膜情况下,温度也显著高于 T_1 ,表明秸秆对增加地温有较强烈影响。秸秆在埋入土壤后,在土壤微生物作用下分解的同时,也会伴随热量和 CO_2 的放出,同时在覆膜条件下会加快秸秆分解、阻止热量和 CO_2 的散失,这可能是 T_6 地温高的主要原因。

土壤温度→营养生长→产量结构因素→产量之间的因果关系非常复杂,土壤温度对产量形成的影响也因具体覆盖技术不同而异。本研究表明,小麦碎秆夏季覆盖虽然有最明显土壤降温效应,可能受土壤降温较强烈影响,它的营养生长指标(株高和开花期干物质质量)也最低,但其产量反而显著高于 CK(14.1%)和小麦整秆夏季覆盖(41.7%)。而产量最高的秋季覆膜也不具有最明显的增温效应和最高的营养生长量。小麦整秆夏季覆盖产量最低的直接原因是单位面积穗数严重不足,穗数少的原因不是基本苗少、而是成穗率低,成穗率低可能与前期地温较低有关,也可能与非温度未知因素有关。可见在一定土壤温度范围内,覆盖引起土壤温度的变化最对西北旱地春小麦产量不产生关键影响。本文虽然从表观简单相关分析发现,各时期和全生育期土壤温度与产量、产量因素无显著相关,但简单相关分析并不能揭示土壤温度与产量形成间真实的内在联系。土壤温度或大或小肯定影响生长和产量形成。

土壤温度影响土壤水分蒸发,土壤水热交换是同时进行的,因此土壤温度和土壤水分之间存在着必然的互作效应。但本文对各时期对应的土壤温度和水分相关分析发现,二者间无显著相关,这与覆盖本身有关。覆盖阻碍了土壤水分地表蒸发,导致处理 0—20 cm 的土壤水分差异不大,必然会出现土壤温度和水分不显著相关的情况。

参考文献(References):

- [1] 李守谦. 地膜小麦栽培技术及品种. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1998: 1-18.
- [2] 全国农业技术推广服务中心, 全国农牧渔业丰收计划办公室, 中国农用塑料应用技术学会. 小麦全生育期地膜覆盖栽培技术. 北京: 中国农业出版社, 1997: 1-55.
- [3] 全国农业技术推广总站, 中国地膜覆盖栽培研究会旱粮学组. 旱粮作物地膜覆盖栽培技术. 北京: 农业出版社, 1992: 210-228.
- [4] 陕西省农业厅. 地膜小麦高产栽培技术. 西安: 陕西人民教育出版社, 1999: 45-55.
- [5] 王树森, 邓根云. 地膜覆盖土壤能量平衡及其对土壤热状况的影响. 中国农业气象, 1989, 10(2): 20-25.

- [6] 温晓霞, 韩思明, 赵凤霞, 廖允成, 李岗. 旱作小麦地膜覆盖生态效应研究. 中国生态农业学报, 2003, 11(2): 93-95.
- [7] 吴从林, 黄介生, 沈荣开. 地膜覆盖在冬小麦全生育期内增温保墒作用的试验研究. 中国农村水利水电, 2001, (8): 7-9.
- [8] 高丽娜, 陈素英, 张喜英, 孙宏勇, 王彦梅, 邵立威. 华北平原冬小麦麦田覆盖对土壤温度和生育进程的影响. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 107-113.
- [9] 王虎全, 韩思明, 唐拴虎, 李岗, 谢惠民. 渭北旱原冬小麦全程地膜覆盖超高产栽培技术研究. 干旱地区农业研究, 1998, 16(1): 24-30.
- [10] 王俊, 李凤民, 宋秋华, 李世清. 地膜覆盖对土壤水温和春小麦产量形成的影响. 应用生态学报, 2003, 14(2): 205-210.
- [11] 萧复兴, 李海金, 刘国定, 胡联军, 米泽民. 旱地麦田二次秸秆覆盖增产模式及机理研究. 水土保持研究, 1996, 3(3): 70-76.
- [12] 马忠明, 徐生明. 甘肃河西绿洲灌区玉米秸秆覆盖效应的研究. 甘肃农业科技, 1998, (3): 14-16.
- [13] 李茂松, 王一鸣, 周凌希. 不同覆盖材料对春玉米田间土壤水热状况和生长发育及产量的影响. 水土保持研究, 1995, 2(1): 18-22.
- [14] Ram H, Singh Y, Saini K S, Kler D S, Timsina J, Humphreys E J. Agronomic and economic evaluation of permanent raised beds, no tillage and straw mulching for an irrigated maize-wheat system in northwest India. *Experimental Agriculture*, 2012, 48(1): 21-38.
- [15] 李月兴, 张宝丽, 魏永霞. 秸秆覆盖的土壤温度效应及其对玉米生长的影响. 灌溉排水学报, 2011, 30(2): 82-85.
- [16] 周凌云. 秸秆覆盖对农田土壤物理条件影响的研究. 农业现代化研究, 1997, 18(5): 311-313, 320-320.
- [17] Gan Y T, Siddique K H M, Turner N C, Li X G, Niu J Y, Yang C, Liu L P, Chai Q. Chapter seven-ridge-furrow mulching systems-an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments. *Advances in Agronomy*, 2013, 118: 429-476.
- [18] Zhang S L, Lövdahl L, Grip H, Tong Y N, Yang X Y, Wang Q J. Effects of mulching and catch cropping on soil temperature, soil moisture and wheat yield on the Loess Plateau of China. *Soil & Tillage Research*, 2009, 102(1): 78-86.
- [19] 陈素英, 张喜英, 刘孟雨. 玉米秸秆覆盖麦田下的土壤温度和土壤水分动态规律. 中国农业气象, 2002, 23(4): 34-37.
- [20] 胡明芳, 田长彦. 新疆棉田地膜覆盖耕层土壤温度效应研究. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 128-130.
- [21] 陈恒洪, 柴守玺, 黄彩霞, 杨长刚, 常磊. 地膜覆盖对旱地春小麦土壤温度的影响. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(1): 63-67.
- [22] 员学锋, 吴普特, 汪有科, 徐福利. 免耕条件下秸秆覆盖保墒灌溉的土壤水、热及作物效应研究. 农业工程学报, 2006, 22(7): 22-26.
- [23] 刘冬青, 辛淑荣, 张世贵. 不同覆盖方式对旱地棉田土壤环境及棉花产量的影响. 干旱地区农业研究, 2003, 21(2): 18-21.
- [24] Cao J S, Zhou X, Zhang W J, Liu C M, Liu Z J. Effects of mulching on soil temperature and moisture in the rain-fed farmland of summer corn in the Taihang mountain of China. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2012, 10(1): 519-523.
- [25] 党占平, 刘文国, 周济铭, 强秦, 曹卫贤, 高亚军, 李生秀. 渭北旱地冬小麦不同覆盖模式增温效应研究. 西北农业学报, 2007, 16(2): 24-27.
- [26] 刘炜, 高亚军, 杨君林, 杨学云, 李生秀. 旱地冬小麦返青前秸秆覆盖的土壤温度效应. 干旱地区农业研究, 2007, 25(4): 197-201.
- [27] 李玲玲, 黄高宝, 张仁陟, 晋小军, Li G D, Chan K Y. 免耕秸秆覆盖对旱作农田土壤水分的影响. 水土保持学报, 2005, 19(5): 94-96, 116-116.
- [28] 徐玉凤, 王辉, 苗瑞东, 曹仪植. 地膜穴播春小麦增产的生理生化机理初探. 西北植物学报, 2001, 21(1): 67-74.
- [29] 李凤民, 鄢珣, 王俊, 李世清, 王同朝. 地膜覆盖导致春小麦产量下降的机理. 中国农业科学, 2001, 34(3): 330-333.
- [30] 张冬梅, 池宝亮, 黄学芳, 刘恩科, 张健. 地膜覆盖导致旱地玉米减产的负面影响. 农业工程学报, 2008, 24(4): 99-102.
- [31] 徐兆飞. 山西小麦. 北京: 中国农业出版社, 2006, 312-316.
- [32] 邵会通, 赵宗武. 小麦播期与积温相关性研究. 河南农林科技, 1984, (9): 8-10.
- [33] 于振文. 作物栽培学各论(北方本). 北京: 中国农业出版社, 2013: 54-55.
- [34] 涂纯, 王俊, 刘文兆. 不同覆盖条件下旱作农田土壤呼吸及其影响因素. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1103-1110.
- [35] Liu Y, Shen Y F, Yang S J, Li S Q, Chen F. Effect of mulch and irrigation practices on soil water, soil temperature and the grain yield of maize (*Zea mays* L.) in Loess Plateau, China. *African Journal of Agricultural Research*, 2011, 6(10): 2175-2182.
- [36] Woldetsadik K. Response of Shallots to mulching and nitrogen fertilization. *HortScience*, 2003, 38(2): 217-221.
- [37] Li R, Hou X Q, Jia Z K, Han Q F, Ren X L, Yang B P. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2013, 116: 101-109.