

不同秸秆覆盖模式下农田土壤水温效应研究

蔡太义^{1,2}, 陈志超¹, 黄会娟³, 黄耀威⁴, 张合兵¹, 刘昌华¹, 贾志宽^{2*}

(1. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 3. 河南理工大学体育学院, 河南 焦作 454000; 4. 河南省农业厅, 郑州 450008)

摘要:为探明不同秸秆覆盖模式下农田土壤温度和水分效应问题,于2007—2010年在陕西合阳县西北农林科技大学旱农试验站,以不覆盖为对照(CK),设置3个水平秸秆覆盖量(4500、9000、13 500 kg·hm⁻²)在全年覆盖方式(QSM)下(分别以S1、S2和S3表示)和生育期覆盖方式(SSM)下(分别以S4、S5和S6表示)的定位试验。结果表明,不同覆盖处理在0~25 cm土层的降温效应,表现为随覆盖量的增加而增大,随土壤深度增加而减小。在0~15 cm土层“低温效应”在全生育期内表现出前期大、后期小的变化趋势。0~5 cm土层不同处理的地温日变化在早上6:00最低,与CK差异最小;中午14:00最高,与CK差异最大;晚上20:00介于前两者之间。QSM方式下,S1、S2和S3处理与CK相比,3个年度休闲期的0~200 cm土壤贮水量分别增加7.6、10.8、12.3 mm;生育期内0~20 cm土层土壤含水率分别高出3.9%、8.5%和11.8%。SSM下各覆盖量处理土壤温度和水分运移规律与QSM方式相似,但均弱于后者。从水温效应综合来看,QSM覆盖方式整体优于SSM方式,尤以S2处理综合表现较优。故在渭北旱塬或其他同类生态区进行玉米整秆秸秆覆盖时,推荐选择QSM方式,且以9000 kg·hm⁻²覆盖量为宜。

关键词: 秸秆覆盖模式; 土壤温度; 土壤水分; 渭北旱塬

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2013)07-1396-09 **doi:** 10.11654/jaes.2013.07.017

Effects of Different Modes of Cropping Systems Using Straw Mulch on the Soil Temperature and Soil Water on the Weibei Highland Region of China

CAI Tai-yi^{1,2}, CHEN Zhi-chao¹, HUANG Hui-juan³, HUANG Yao-wei⁴, ZHANG He-bing¹, LIU Chang-hua¹, JIA Zhi-kuan^{2*}

(1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. Chinese Institute of Water-saving Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. School of Physical Education, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 4. The Agriculture Department of Henan Province, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: We evaluated the effect of different modes of cropping systems using straw mulch on the soil temperature, soil water and grain yield of spring maize (*zea mays* L.) in 2007—2010 at the Dry Farming Base of Northwest A&F University, Heyang County in the Weibei Highland region of China. Seven treatments were used, including conventional tillage (CK), maize straw mulching at the rates of 4500 (S1), 9000 (S2) and 13 500 kg·hm⁻² (S3) year-round (both fallow and growth period) (QSM) and 4500 (S4), 9000 (S5) and 13 500 kg·hm⁻² (S6) during the growth period (SSM). The results showed that the cooling effect of treatments with SSM increased with the rate of straw mulching, and decreased with the soil depth at 0~25 cm soil profile. The low temperature effect of treatments showed a trend of large changes early, and small ones late during the growth period changes at 0~15 cm soil layers. The daily average soil temperature of different treatments at 0~5 cm soil depths was the lowest at 6:00, and the difference was the smallest compared to the CK treatment; the temperature was the highest at 14:00, and the difference was also the largest; the temperature at 20:00 was medium. Compared to the CK with QSM, the 3-year mean soil water storage within the 200 cm soil depth for the S1, S2 and S3 treatments was increased by 7.6 mm, 10.8 mm and 12.3 mm, respectively, over the fallow season; the 3-year mean soil water content within the 20 cm soil depth during the growth period was increased by 3.9%, 8.5% and 11.8%, respectively. The 3-year mean soil temperature and soil water content with SSM showed a similar

收稿日期: 2012-12-22

基金项目: 国土资源部软科学研究项目资助(201343); 中国煤炭工业协会科技项目(MTKJ2010-377); 河南理工大学博士基金(B2012-005)和博士后基金项目; 河南省大中专毕业生就业创业研究项目(JYB2013260); 河南理工大学研究生教育教学改革基金项目(2013YJ08)

作者简介: 蔡太义(1972—), 男, 博士, 主要从事土壤水碳循环和土地生态研究。E-mail: caity2008@hpu.edu.cn

* 通信作者: 贾志宽 E-mail: Jiazhk@126.com

changing trend compared to the QSM, which was overall less for the SSM than for the QSM. The variance analysis showed that compared to the SSM, the QSM was significantly superior ($P<0.05$). Our findings suggested that the farmers should adopt the QSM mode to optimize the efficiency of straw mulching. In addition, the maize straw mulching rate of $9000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ could be the optimal for the Weibei Highland region, China. Our study provides scientific reference for the application of straw mulch in other dryland farming regions throughout the world.

Keywords: straw mulching mode; soil temperature; soil water; Weibei Highland region

自 1936 年 Hallsted 和 Mathews 最早开展秸秆覆盖研究以来^[1], 秸秆覆盖在改善土壤团聚体结构^[2]、调节水分状况^[3-4]、增加农田土壤固碳能力^[5]、增强作物光合特性^[6]、提高作物产量^[7]、增加经济效益^[8-9]等方面, 已取得了较大研究进展。在此基础上, 秸秆覆盖的定量研究、尤其不同量秸秆覆盖条件下农田土壤水温效应方面亦取得重大进展, Duley 和 Russel 研究认为^[10], 覆盖 $4500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 秸秆处理的土壤贮水量较对照 (不盖秸秆) 增加 2 倍; Liu 等^[9]关于不同水分管理措施的试验表明, 覆盖 $6000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 玉米秸秆处理的 2 m 土壤贮水量较不覆盖处理显著增加了 30 mm; 员学锋等^[11]在桃树的覆盖试验表明, 0~50 cm 土层土壤储水量和秸秆覆盖量呈很好的二次相关性。温度效应方面, Unger^[12]研究表明, 在 $0 \sim 12\,000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 小麦秸秆量范围内, 每增加 $1000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 秸秆, 0~10 cm 土层土壤温度夏季下降 0.55°C , 冬季则升高 0.08°C ; Cook 等^[13]研究表明, 覆盖 $8000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 小麦秸秆处理的土壤温度, 早上和中午比不覆盖处理分别降低 2.0 和 2.8°C 。但迄今为止, 有关秸秆覆盖的“低温效应”目前还存在较大争议^[14-15]。

春玉米是黄土高原半湿润易旱区重要的粮食作物, 一年一熟, 多实行冬季休闲, 主要依赖自然降水, 但降水年际间波动剧烈, 且季节性分布不均, 致使产量常低而不稳。近年来, 该区已开展了不少秸秆覆盖试验^[3-4, 16], 然而, 不同降水年型、不同秸秆覆盖模式条件下渭北旱塬春玉米农田的水温效应问题, 目前尚缺乏系统研究, 适宜的秸秆覆盖量数据更未明确。鉴此, 开展渭北旱塬不同秸秆覆盖模式的定位、定量试验, 集中探讨覆盖农田土壤水温运移规律, 旨在为旱地农业节水及完善秸秆覆盖栽培理论等提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设在陕西省合阳县甘井镇西北农林科技大学旱农基地 ($34^\circ 15' \text{N}$, $106^\circ 30' \text{E}$, 海拔 900 m, 试验地坡度 0.42%), 多年平均降水量为 538.2 mm, 主要集中

在 7—9 月 (图 1a), 年蒸发量 $1\,832.8 \text{ mm}$, 干燥度为 1.5, 是黄土高原中南部典型的半湿润易旱区。

当地地面平坦开阔, 光热资源充足, 年平均温度为 10.5°C (图 1b), 无霜期 170~180 d。供试土壤为中壤质壤土, 试验前土壤 (2007 年) 基本理化性质如下: 0~100 cm 土层的田间持水率、土壤平均体积质量和孔隙度分别为 22.1% ($1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 和 49.3%; 0~20 cm 耕层土壤, 总有机质、全氮、全磷和全钾质量分数依次为 10.9、0.8、0.6、 $7.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 硝态氮、铵态氮、速效磷和速效钾质量分数分别为 24.6、1.9、11.6、 $113.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; pH 值为 8.1。

1.2 试验设计

秸秆覆盖量设置依据: 参考国内外相关文献并结合黄土高原旱地春玉米秸秆产量多在 $9000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

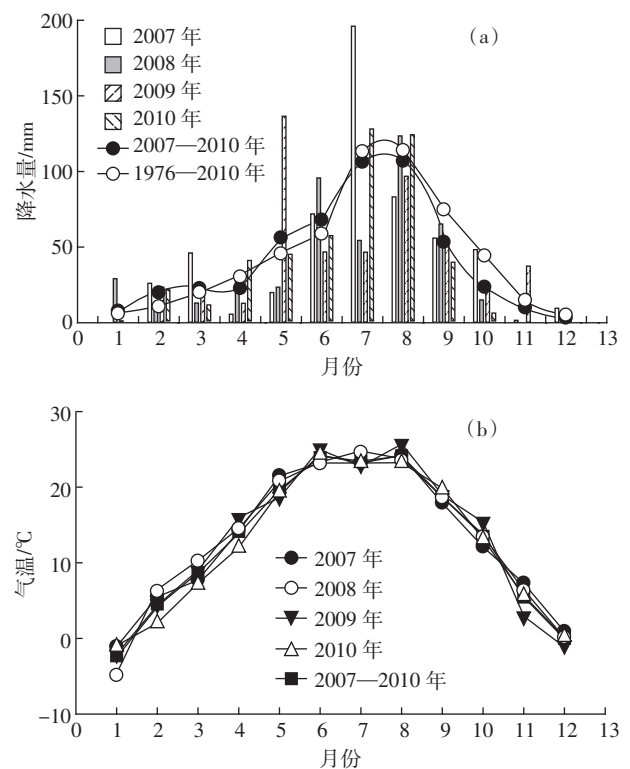


图 1 甘井试验站历年降水量(a)和气温(b)分布

Figure 1 Distribution of the monthly precipitation(a) and air temperature(b) with different years at the dryland in Ganjing Town

左右,设计中间覆盖量为 $9000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (一公顷玉米生产的秸秆可以覆盖一公顷土地)。为探讨不同秸秆覆盖量的规律性变化,设置中间量减半处理($4500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和中间量加半处理($13\ 500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

试验于2007年春季春玉米播种开始,连续进行3个生产年度(2007—2010)。采用裂区设计,覆盖方式(全年覆盖和生育期覆盖,分别以QSM和SSM表示)为主处理,覆盖量(4500 、 9000 、 $13\ 500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 共3个覆盖量)为副处理。QSM处理(休闲期和春玉米生育期均进行秸秆覆盖)设3个水平覆盖量处理: 4500 、 9000 、 $13\ 500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别以S1、S2和S3表示。SSM处理(在春玉米播种后进行覆盖,持续整个生育期)亦设3个水平覆盖量处理: 4500 、 9000 、 $13\ 500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 分别以S4、S5和S6表示。试验共6个覆盖量处理,3次重复,均以全程不覆盖为对照(CK),小区面积 40 m^2 ,各小区间设置 2 m 宽保护区(按传统种植方式播种),所有小区采用定位试验(各小区位置和秸秆覆盖量保持不变)。

1.3 试验方法

冬闲期覆盖是在前茬玉米收获后,将上茬覆盖未腐解的秸秆铡碎,人工翻耕($15 \sim 20 \text{ cm}$)还田,然后按照试验设计再进行整秆均匀覆盖;生育期秸秆覆盖是在春玉米播种后,按照试验设计进行整秆均匀覆盖。

播前施肥整地:对于休闲期覆盖处理,首先将覆盖于地表的秸秆搂到地头,然后进行人工浅翻、施肥和整地。各小区统一施肥:尿素(总氮 $\geq 46.4\%$) $525.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;磷酸二铵(总养分 $\geq 60.0\%$, N-P-K: 17-43-0) $326.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;KCl($\text{K}_2\text{O} \geq 60.0\%$) $330.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。对于休闲期不覆盖处理,人工翻耕耙耱整平。为防治地下害虫,所有处理整地前撒施呋喃丹 $28.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

供试品种为豫玉22号,南北行种植,人工穴播,行株距 $67.5 \text{ cm} \times 30.0 \text{ cm}$,人工间苗,留苗 $49\ 500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,每年4月23—25日播种;QSM方式下,春玉米播种后,将每一小区搂到地边的秸秆重新按照试验设计要求(损失时应及时补充)均匀覆盖到原来小区。SSM方式下,春玉米播种后,按试验设计进行整秆均匀覆盖。所有处理生育期不追肥,无补充灌溉。每年9月17—20日进行人工收获。

1.4 指标测定方法

1.4.1 土壤温度测定

采用曲管地温计3次重复测定各处理 $0 \sim 5$ 、 $5 \sim 10$ 、 $10 \sim 15$ 、 $15 \sim 20$ 、 $20 \sim 25 \text{ cm}$ 土层土壤温度。其中,地温日变化分别在 $6:00$ 、 $8:00$ 、 $10:00$ 、 $12:00$ 、 $14:00$ 、

$16:00$ 、 $18:00$ 和 $20:00$ 进行监测;地温季节性变化分别在播后 30 、 60 、 90 、 120 、 150 d 后测定,各时期测定均连续监测 3 d (晴天)并取其平均值作为该时期的地温值。

1.4.2 土壤含水率测定

采用常规土钻取土烘干法,测定 $0 \sim 200 \text{ cm}$ 土层深度,每 20 cm 为一间隔,取样时间分别在播种前(休闲末期)、播后 60 d (拔节期)、播后 90 d 、播后 120 d 和播后 150 d ,重复3次测定。

1.5 计算公式

土壤贮水量(W)及籽粒产量水分利用效率(WUE)计算公式^[17],试验地坡度较小,且渭北旱塬地下水深度多在 50 m 以下,地下水供给可忽略不计,故农田水分平衡计算公式可简化为以下公式:

$$W = H \times D \times B\% \times 10 \quad (1)$$

$$ET = (W_1 - W_2) + P \quad (2)$$

式中: W 为土壤贮水量,mm; H 为土层深度,m; D 为土壤平均体积质量, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; $B\%$ 为土壤含水率; ET 为农田蒸散量,mm; W_1 、 W_2 为相邻两次取样时 $0 \sim 200 \text{ cm}$ 土层储水量,mm; P 为作物生育期降水量,mm。

1.6 数据处理与统计分析

采用 SAS 8.01 对试验数据进行单因素方差(ANOVA)分析,最小显著差数法(LSD)进行显著性检验($P < 0.05$),采用 Sigma plot 11.0 制图。

2 结果与讨论

2.1 土壤温度

QSM 和 SSM 下地温变化规律相似,故选取 SSM 下各处理的地温为代表进行动态变化分析。已有研究表明,秸秆覆盖条件下 $0 \sim 15 \text{ cm}$ 土层地温变化明显,尤以 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 土层变化最大,而 $15 \sim 25 \text{ cm}$ 变化不明显^[18],故本研究中不同处理地温的生育期变化和日变化分别以 $0 \sim 15 \text{ cm}$ 和 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 土层作为研究对象。

2.1.1 不同处理地温的空间变化

图2为2009、2010年不同处理 $0 \sim 25 \text{ cm}$ 土层全生育期平均地温的垂直变化图。S4、S5和S6处理的2年平均地温与CK相比,在 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 土层分别下降 3.4 、 4.4 、 $4.8 \text{ } ^\circ\text{C}$; $5 \sim 10 \text{ cm}$ 土层分别下降 2.2 、 2.9 、 $3.5 \text{ } ^\circ\text{C}$; $10 \sim 15 \text{ cm}$ 土层分别下降 2.0 、 2.7 、 $3.3 \text{ } ^\circ\text{C}$; $15 \sim 20 \text{ cm}$ 土层分别下降 1.6 、 2.3 、 $2.6 \text{ } ^\circ\text{C}$; $20 \sim 25 \text{ cm}$ 土层分别下降 1.3 、 2.2 、 $2.6 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

统计分析表明,S4、S5和S6处理 $0 \sim 25 \text{ cm}$ 土层地温较CK均显著降低($P < 0.05$),但S5和S6间无显

著差异($P>0.05$),说明不同量覆盖处理在 0~25 cm 土层均能起到降温效果,且表现为随覆盖量递增而增大,随土壤深度增加而减小。这与巩杰等^[19]及于晓蕾等^[18]研究结果一致。本研究 0~25 cm 土层地温变化幅度在 2009、2010 年存在一定差异,可能与两年的不同降水量有关(图 1)。

2.1.2 不同处理地温的生育期变化

图 3 为 2009、2010 年春玉米不同处理生育时期 0~15 cm 土层平均温度变化图。S4、S5 和 S6 处理 0~15 cm 土层的平均地温与 CK 相比,播后 30 d 降低 2.6~3.9 °C,播后 60 d 降低 3.2~4.2 °C,播后 90 d 降低 0.5~1.7 °C,播后 120 d 则升高 0.4~0.3 °C,播后 150 d 升高 0.1~0.2 °C,全生育期平均降低 0.9、1.6 °C 和 1.9 °C。其中,S5 和 S6 均显著($P<0.05$)低于 CK 和 S4,但 S5 与 S6 之间则无显著差异($P>0.05$)。可见,全生育

期内,不同量覆盖处理的“低温效应”表现为前期大,后期小的变化趋势,与前人结论一致^[12,20-21],原因在于生育期内随时间的推移,玉米叶面积指数逐渐增大,其降温效应逐渐减小。但本研究 2010 年播后 120~150 d 呈现微弱的增温效应(图 3),这可能与渭北旱塬 8 月中下旬温度偏低及温差较大有关,下一步应加强此方面的研究,以便揭示真正的诱因。此外,本研究年际间不同处理“低温效应”最明显的时间亦不同,2009 年出现在播后 60 d,2010 年则出现在播后 30 d,这可能是由于在不同的水热条件下,秸秆覆盖的调控能力存在差异有关^[22]。

2.1.3 不同处理地温的日变化

秸秆覆盖下土壤温度昼夜波动剧烈,尤以中午和 5 cm 土层覆盖处理和不覆盖处理的差值最大^[23]。本研究不同处理 0~5 cm 土层在播后 60 d 的地温日变化显

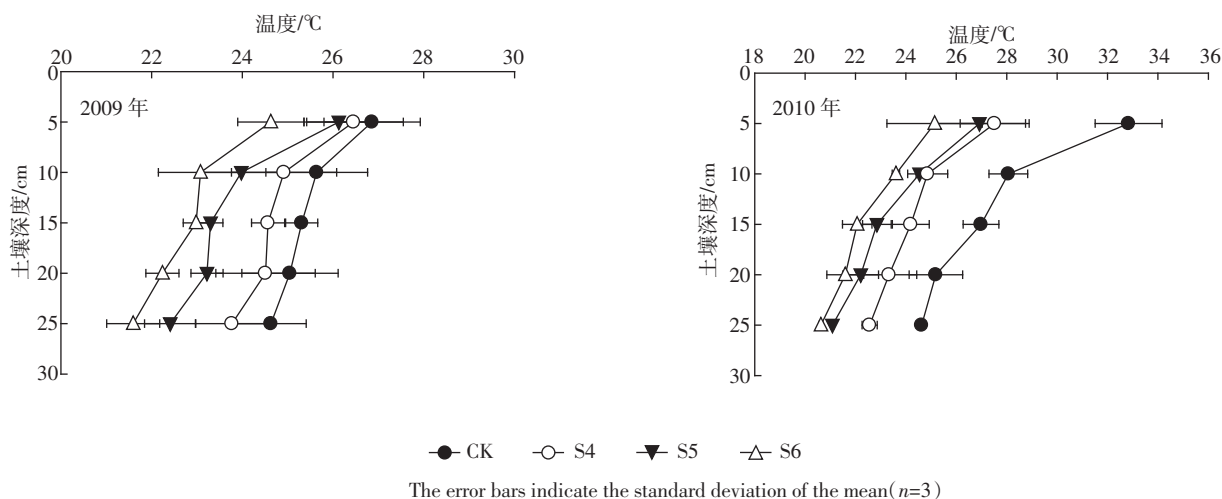


图 2 2009 和 2010 年不同处理 0~25 cm 土层全生育期平均地温的垂直变化

Figure 2 Vertical change of mean soil temperature at 0~25 cm soil layers with different treatments during the growth period in 2009—2010

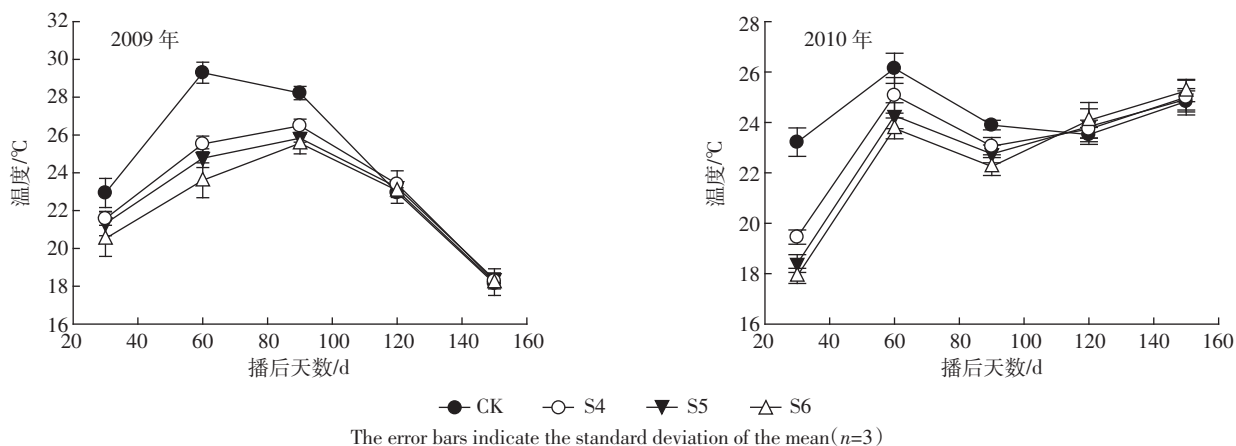


图 3 2009 和 2010 年不同处理生育期 0~15 cm 土层平均温度的变化

Figure 3 Change of mean soil temperature at 0~15 cm soil layers with different treatments during growth period in 2009—2010

示(图4),S4、S5和S6处理地温在早上6:00分别比CK高2.3~2.5℃、1.4~1.5℃和0.4~0.6℃;中午14:00分别比CK低1.2~8.8℃、3.2~11.8℃和4.1~13.1℃;晚上20:00,在2009年分别比CK低4.3、5.5℃和6.1℃,而在2010年分别比CK高0.9、0.4℃和0.1℃。可见,不同量覆盖处理的地温日变化中,早上6:00最低,与CK差异最小(2010年除外);中午14:00最高,差异亦最大;晚上20:00介于前两者之间。这说明不同覆盖量处理均有平抑极端温度,降低对作物伤害的作用,且这种作用随覆盖量递增而增强,这与王兆伟等^[22]研究结果一致。另外,本研究中,由于观测条件的限制,土壤温度日变化在早上6:00温度最低的结论是建立在6:00—20:00的观测时段内,而24h的地温日变化中究竟在哪个时间点最低,尚需进一步作深入研究。需要指出的是,由于本研究缺失2008年的土壤温度观测数据,仅比较分析了2009年(丰水年)和2010年(正常年)的土壤温度变化,而2008年(干旱年)条件下,秸秆覆盖条件下的温度效应可能更为明显,这成为本研究的一大缺陷,亟需进行补充研究。

关于秸秆覆盖量与土壤温度日变化的关系,张俊鹏等^[24]认为,土壤温度随秸秆覆盖量的增加而递减,但当覆盖量增加到 $7500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,地温趋于稳定。本研究表明,S5($9000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和S6($13\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)处理的0~5 cm土层的地温日变化无显著差异,与前者研究结果存在一定差异,这可能与不同降水条件和不同种植季节有关。

2.2 土壤水分

2.2.1 休闲期土壤水分

休闲期土壤蓄水(保水)量系指休闲末0~200 cm

土壤贮水量与休闲前0~200 cm土壤贮水量差额。表1为两种覆盖方式下各处理3个年度休闲期的土壤水分变化状况。由表1可知,CK处理3个年度2 m土壤水分均不同程度受到损失,其中2007—2008年度损失最多(20.7 mm),2009—2010年度次之(6.0 mm),2008—2009年度最少(4.3 mm),3个年度休闲期平均损失10.3 mm的土壤水分。

QSM方式下,不同覆盖处理0~200 cm土壤水分,在2007—2008年度均受到损失(0.3~6.0 mm);而2008—2009年度和2009—2010年度均表现为:S1处理土壤水分损失较大,S2和S3处理土壤水分均增加。3个年度休闲期的0~200 cm土壤贮水量,S1处理平均减少2.7 mm,S2和S3处理平均分别增加0.5、2.0 mm。与CK相比,S1、S2和S3处理分别增加7.6、10.8、12.3 mm(其中,S2和S3处理间无显著差异)。可见,休闲期不同处理的蓄水保墒能力不仅受自然降水的影响,而且表现为随覆盖年限的延长和覆盖量的增加而逐步增强。

SSM方式下,不同覆盖处理0~200 cm土壤水分在3个年度休闲期的变化与QSM方式下覆盖处理的变化趋势基本一致,但蓄水保墒能力整体劣于QSM方式。3个年度休闲期的0~200 cm土壤水分,S1处理平均减少6.7 mm,S2处理平均减少0.7 mm,但S3处理平均增加0.4 mm,与CK比较,S1、S2和S3处理分别增加3.6、9.6和10.7 mm(其中,S2和S3处理间亦无显著差异)。

QSM和SSM方式比较来看,两者较CK均明显表现出较强的蓄水保墒能力。其中,QSM方式下,各覆盖量处理农田土壤水分的损失量,在2007—2008

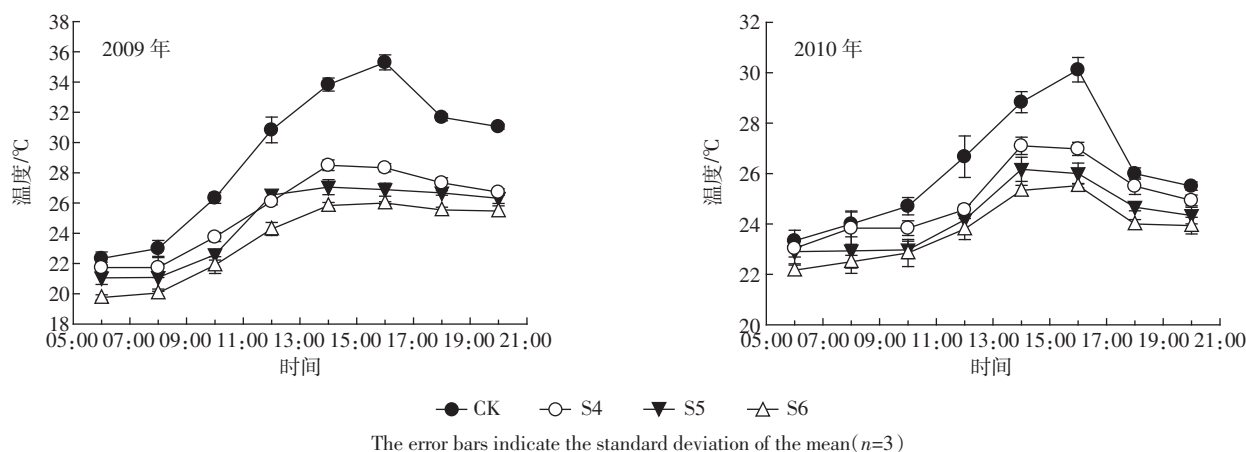


图4 2009和2010年播后60 d不同处理0~5 cm土层地温日变化

Figure 4 Change of daily mean soil temperature at 0~5 cm soil layers with different treatments after sowing 60 days in 2009—2010

表 1 不同处理 0~200 cm 土层土壤贮水量在 2007—2010 年休闲期的变化(cm)

Table 1 Variation of soil water storage at 0~200 cm soil layers at fallow stage with different treatments in 2007—2010(cm)

覆盖方式	处理	2007—2008 年度休闲期			2008—2009 年度休闲期			2009—2010 年度休闲期			3 年休闲期平均变化	各处理比 CK
		2007 年收获	2008 年播前	$\Delta=2008$ 年播前—2007 年收获	2008 年收获	2009 年播前	$\Delta=2009$ 年播前—2008 年收获	2009 年收获	2010 年播前	$\Delta=2010$ 年播前—2009 年收获		
无覆盖	CK	506.5±2.6b	485.8±2.1c	-20.7	430.3±3.9b	426.0±2.6c	-4.3	421.7±1.7c	415.7±2.4c	-6.0	-10.3	0.0d
	QSM	513.8±2.4b	507.4±2.4b	-6.4	439.5±2.7b	438.9±1.1b	-0.6	429.1±2.8b	428.0±1.9b	-1.1	-2.7	7.6c
	S2	518.3±2.3ab	514.6±0.5a	-3.7	445.1±1.2ab	445.9±2.4ab	0.8	436.7±1.4ab	441.0±2.7ab	4.3	0.5	10.8ab
	S3	524.1±0.3a	523.8±0.5a	-0.3	453.1±3.4a	455.0±3.1a	1.9	441.6±3.2a	446.0a±4.2a	4.4	2.0	12.3a
无覆盖	CK	506.5±2.7b	485.8±2.2c	-20.7	430.3±2.2b	426.0±1.3b	-4.3	421.7±1.6b	415.7±2.8bc	-6.0	-10.3	0.0c
	SSM	510.7±2.2b	495.8±1.9b	-14.9	432.5±1.7b	430.1±2.7b	-2.3	423.1±4.2b	420.2±4.1b	-3.0	-6.7	3.6c
	S5	517.3±0.2a	514.6±2.5a	-2.6	442.6±3.6a	441.6±3.8ab	-1.0	433.4±3.7a	435.0±2.8a	1.6	-0.7	9.6ab
	S6	518.2±0.9a	516.0±3.0a	-2.2	447.8±4.3a	449.3±4.2a	1.5	438.6±5.3a	440.7±3.4a	2.1	0.4	10.7a
QSM		518.7	515.3	-3.5	445.9	446.6	0.7	435.8	438.3	2.5	-0.1	10.2
SSM		515.4	508.8	-6.6	441.0	440.3	-0.6	431.7	432.0	0.2	-2.3	8.0
QSM 比 CK/%				-83.3			-116.2			-141.8	-113.8	
SSM 比 CK/%				-68.2			-85.8			-103.8	-85.9	

注:表中数据为平均值±标准误,每种覆盖方式下同一列内不同小写字母表示在 0.05 水平上与 CK 的差异显著。

Note: Values are mean±standard error. Different lowercase letters in the same column with each mulch model denote significant differences ($P<0.05$) compared to CK treatment.

年度、2008—2009 年度、2009—2010 年度较 CK 分别减少 83.3%、116.2% 和 141.8%, 3 个年度平均减少 113.8%; 而 SSM 方式下, 各覆盖量处理农田土壤水分的损失量, 3 个年度较 CK 分别减少 68.2%、85.8% 和 103.8%, 平均减少 85.9%。由此可见, QSM 方式下各覆盖处理的平均农田土壤保水(蓄水)量显著高于 SSM 方式, 说明 QSM 下各处理经过半年多的蓄水和保水, 可为渭北旱塬春玉米提供良好的底墒, 有利于春玉米的及时播种和提高春玉米的出苗率和成活率, 这与尚金霞等^[25]研究结论一致。

2.2.2 生育期土壤含水率空间变化

图 5 为不同覆盖量处理 2008—2010 年生育期 2 m 土层土壤含水率的变化图。由图 5 可知, 各覆盖处理土壤含水率在不同降水年型与 CK 存在较大差异, 其中, 2010 年差异最大, 2008 年次之, 2009 年最小。为进一步比较不同处理各土层土壤含水率变化情况, 表 2 对各处理不同土层 3 年平均土壤含水率进行了对比分析。

QSM 方式下, S1、S2 和 S3 处理 3 年平均土壤含水率, 在 0~20 cm 土层较 CK 分别提高 3.9%、8.5% 和 11.8%, 差异均达显著水平 ($P<0.05$); 在 20~60 cm 土层, 较 CK 分别提高 2.5%、4.4% 和 7.0%; 在 60~100 cm 土层, S2 和 S3 较 CK 分别显著提高 3.6% 和 4.2% ($P<0.05$), 但 S1 和 CK 无显著差异; 在 100~200 cm 土

层, 各覆盖处理与 CK 差异进一步减小, 其中, S2 和 S3 分别较 CK 显著提高 3.8% 和 4.3% ($P<0.05$), 但 S1 和 CK 无显著差异。

SSM 方式下各覆盖量处理的 3 年平均含水率变化规律与 QSM 下各处理相似(表 2), 但整体低于后者。这说明 SSM 方式在深层土壤水分恢复方面整体弱于 QSM 方式。从 2 m 土层 3 年平均土壤含水率来看(表 2), S1、S2 和 S3 较 CK 分别提高 2.4%、4.8% 和 6.7%, S4、S5 和 S6 比 CK 分别提高 1.2%、3.6% 和 4.8%。

由此可见, QSM 下各处理不同土层的平均土壤含水量均优于 SSM 方式, 且表现为随土层的加深而逐渐减小, 随覆盖量的递增而逐渐提高的变化趋势。结合不同土层的土壤水分恢复能力来看, QSM 应是渭北旱塬适宜的覆盖方式, 且以 S2 和 S3 处理表现较优。

2.3 覆盖模式和覆盖量

因覆盖材料、作物品种和生态区域不同, 国内外学者关于秸秆覆盖量水温效应的研究结果存在较大差异。Unger 等^[26]研究表明, 在美国东南部大平原地区免耕覆盖 8000~12 000 kg·hm⁻² 小麦秸秆, 对农田水温生态效应明显; 王兆伟等^[27]等认为, 在山西寿阳旱农区 4500 kg·hm⁻² 的玉米秸秆覆盖量对农田土壤水温的调控效果最佳。本研究表明, 渭北旱塬 QSM 方式

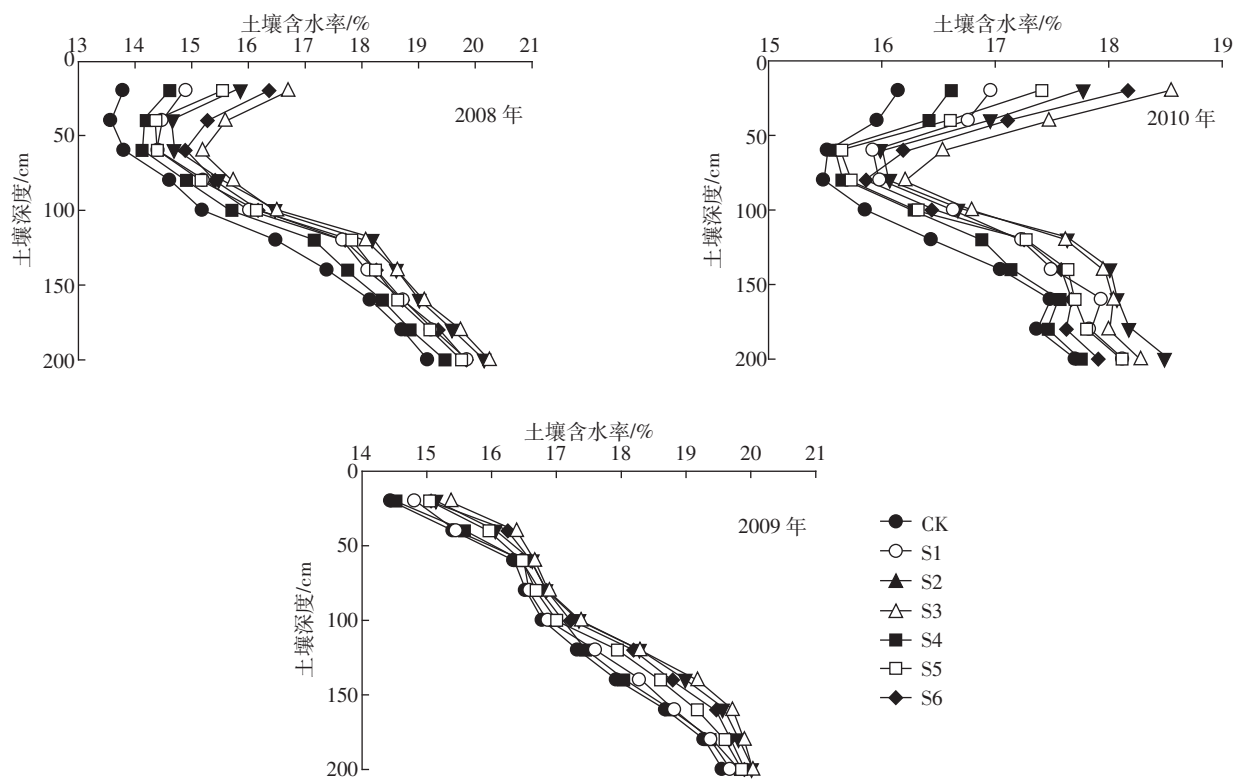


图 5 2008—2010 年不同处理 0~200 cm 土壤含水率空间变化

Figure 5 Variation of soil water content at 0~200 cm soil depths during the growth period with different treatments in 2008—2010

表 2 不同处理 0~200 cm 土层的 3 年平均土壤含水率变化

Table 2 Variation of mean water content at 0~200 cm soil layers at the growth period of spring maize with different treatments in 2008—2010

土层/cm	CK	QSM			S1 比 CK/%	S2 比 CK/%	S3 比 CK/%
		S1	S2	S3			
0~20	15.3±2.4b	15.9±2.3b	16.6±1.9ab	17.1±2.1a	3.9	8.5	11.8
20~60	15.8±1.8c	16.2±1.7b	16.5±1.3a	16.9±1.5a	2.5	4.4	7.0
60~100	16.5±2.6c	16.9±2.5bc	17.1±2.1a	17.2±2.3a	2.4	3.6	4.2
100~200	18.4±3.5b	18.8±3.3b	19.1±2.9a	19.2±3.3a	2.2	3.8	4.3
0~200	16.5±1.7c	16.9±1.6c	17.3±1.2a	17.6±1.3a	2.4	4.8	6.7
土层/cm	CK	SSM			S4 比 CK/%	S5 比 CK/%	S6 比 CK/%
		S4	S5	S6			
0~20	15.3±2.4b	15.6±2.4b	16.3±2.0a	16.8±2.3a	2.0	6.5	9.8
20~60	15.8±1.8b	16.1±1.8ab	16.3±1.4a	16.7±1.6a	1.9	3.2	5.7
60~100	16.5±2.6a	16.7±2.6a	16.8±2.2a	17.0±2.5a	1.2	1.8	3.0
100~200	18.4±3.5a	18.5±3.6a	18.8±3.2a	18.9±3.6a	0.5	2.2	2.7
0~200	16.5±1.7b	16.7±1.7b	17.1±1.3a	17.3±1.5a	1.2	3.6	4.8

注:表中数据为平均值±标准误,每种覆盖方式下同一行内不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Note: Values are mean ± standard error. Different lowercase letters in the same column with each mulch model denote significant differences ($P<0.05$).

整体优于 SSM 方式,其中,4500 kg·hm⁻² 秸秆覆盖处理节水、降温效应不明显可能是因为秸秆覆盖量较少;13 500 kg·hm⁻² 秸秆覆盖处理因秸秆覆盖量过大,致使“低温效应”严重,不利于春玉米出苗和前期生

长。综合来看,9000 kg·hm⁻² 秸秆覆盖处理表现较优。因此,渭北旱塬或其他同类生态区采用玉米整秸秆覆盖时推荐选择 QSM 方式,且以 9000 kg·hm⁻² 覆盖量为宜。

3 结论

(1)不同覆盖处理对土壤的温度效应呈现出:在0~25 cm 土层的降温效应,表现为随覆盖量的增加而增大,随土壤深度增加而减小;0~15 cm 土层的“低温效应”在全生育期内表现出前期大,后期小的变化趋势;0~5 cm 土层地温日变化,在早上 6:00 最低,与 CK 差异最小,中午 14:00 最高,差异最大,晚上 20:00 介于前两者之间。

(2)QSM 方式下,S1、S2 和 S3 处理与 CK 相比,3 个年度休闲期的 0~200 cm 土壤贮水量分别增加 7.6、10.8、12.3 mm;在 3 年生育期内 0~20 cm 土层土壤含水率分别高出 3.9%、8.5%和 11.8%。

(3)在渭北旱塬或其他同类生态区进行玉米整秸秆覆盖时,推荐选择 QSM 方式,且以 9000 kg·hm⁻² 覆盖量为宜。

参考文献:

- [1] Hallsted A, Mathews O. Soil moisture and winter wheat with suggestions on abandonment[J]. *Kansas Agric Exp Stn*, 1936, Bull. No. 273.
- [2] Blanco-Canqui H, Lal R. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till [J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 95(1-2): 240-254.
- [3] Liu Y, Li S Q, Chen F, et al. Soil water dynamics and water use efficiency in spring maize (*Zea mays* L.) fields subjected to different water management practices on the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(5): 769-775.
- [4] 蔡太义, 贾志宽, 孟 蕾, 等. 渭北旱塬不同秸秆覆盖量对土壤水分和春玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 43-48.
CAI Tai-yi, JIA Zhi-kuan, MENG Lei, et al. Effects of different rates of straw mulch on soil moisture and yield of spring maize (*Zea mays* L.) in WeiBei Highland area, China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(3): 43-48.
- [5] 蔡太义, 黄会娟, 黄耀威, 等. 不同量秸秆覆盖还田对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(6): 964-974.
CAI Tai-yi, HUANG Hui-juan, HUANG Yao-wei, et al. Effects of different rates of straw mulching and returning to field on soil labile organic carbon and carbon pool management index[J]. *Journal of Natural Resource*, 2012, 27(6): 964-974.
- [6] 蔡太义, 张合兵, 黄会娟, 等. 不同量秸秆覆盖对春玉米光合生理的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2128-2135.
CAI Tai-yi, ZHANG He-bing, HUANG Hui-juan, et al. Effects of cropping systems using straw mulching on photosynthetic physiology of spring Maize (*Zea mays* L.) during different rates[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2128-2135.
- [7] Wang Ya-jun, Xie Zhong-kui, Sukhdev S Malhi, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(3): 374-382.
- [8] 蔡太义, 贾志宽, 黄耀威, 等. 不同秸秆覆盖量对春玉米田蓄水保墒及节水效益的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 1): 238-243.
CAI Tai-yi, JIA Zhi-kuan, HUANG Yao-wei, et al. Effects of different straw mulch rates on soil water conservation and water-saving benefits in spring maize field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(Suppl 1): 238-243.
- [9] Sharma Peeyush, Vikas Abrol, Sharma R K. Impact of tillage and mulch management on economics, energy requirement and crop performance in maize-wheat rotation in rainfed subhumid inceptisols, India[J]. *European Journal of Agronomy*, 2011, 34(1): 46-51.
- [10] Duley F L, Russel J C. The use of crop residues for soil and moisture conservation[J]. *Jour Amer Soc Agron*, 1939, 31(3): 703-709.
- [11] 员学锋, 吴普特, 汪有科. 秸秆覆盖桃树地生态效应及桃树的生长状况[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 91-94.
YUAN Xue-feng, WU Pu-te, WANG You-ke. Physiological and ecological conditions of peach under the straw mulching treatment[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(1): 91-94.
- [12] Unger P W. Straw mulch effects on soil temperatures and sorghum germination and growth[J]. *Agronomy Journal*, 1978, 70(5): 858.
- [13] Cook H F, GSB Valdes, Lee H C. Mulch effects on rainfall interception, soil physical characteristics and temperature under *Zea mays* L.[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 91(1-2): 227-235.
- [14] 高亚军, 李生秀. 旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 15-19.
GAO Ya-jun, LI Sheng-xiu. Cause and mechanism of crop yield reduction under straw mulch in dryland[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(7): 15-19.
- [15] Zhang Shu-lan, vdahl L L, Grip H, et al. Effects of mulching and catch cropping on soil temperature, soil moisture and wheat yield on the Loess Plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 102(1): 78-86.
- [16] Li Rong, Hou Xian-qing, Jia Zhi-kuan, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on soil water, temperature, and maize yield in Loess Plateau Region of China [J]. *Soil Research*, 2012, 50(2): 105-113.
- [17] 赵聚宝, 梅旭荣, 薛军红, 等. 秸秆覆盖对旱地作物水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 1996, 29(2): 59-66.
ZHAO Ju-bao, MEI Xu-rong, XUE Jun-hong, et al. The effect of straw mulch on crop water use efficiency in dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1996, 29(2): 59-66.
- [18] 于晓蕾, 吴普特, 汪有科, 等. 不同秸秆覆盖量对冬小麦生理及土壤温、湿状况的影响[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(4): 41-44.
YU Xiao-lei, WU Pu-te, WANG You-ke, et al. Effects of different quantity of straw mulching on physiological character of winter wheat and soil moisture and temperature[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(4): 41-44.
- [19] 巩 杰, 黄高宝, 陈利顶, 等. 旱作麦田秸秆覆盖的生态综合效应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(3): 69-73.
GONG Jie, HUANG Gao-bao, CHEN Li-ding, et al. Comprehensive ecological effect of straw mulch on spring wheat field in dryland area[J].

Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(3):69-73.

- [20] 陈素英, 张喜英, 裴冬, 等. 秸秆覆盖对夏玉米田棵间蒸发和土壤温度的影响[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(4):32-36.

CHEN Su-ying, ZHANG Xi-ying, PEI Dong, et al. Soil evaporation and soil temperature in maize field mulched with wheat straw[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(4):32-36.

- [21] 薛宗让, 王盛霞, 刘虎林, 等. 旱地玉米免耕秸秆覆盖量试验[J]. 山西农业科学, 1994, 22(3):31-33.

BI Zong-rang, WANG Sheng-xia, LIU Hu-lin, et al. A research on mulch rates in semi-arid region without cultivation [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 1994, 22(3):31-33.

- [22] 王兆伟, 郝卫平, 龚道枝, 等. 秸秆覆盖量对农田土壤水分和温度动态的影响[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2):244-250.

WANG Zhao-wei, HAO Wei-ping, GONG Dao-zhi, et al. Effect of straw mulch amount on dynamic changes of soil moisture and temperature in farmland[J]. *Agricultural Meteorology*, 2010, 31(2):244-250.

- [23] 蔡太义, 贾志宽, 黄耀威, 等. 中国旱作农区不同量秸秆覆盖综合效应研究进展 I. 不同量秸秆覆盖的农田生态环境效应[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5):63-68.

CAI Tai-yi, JIA Zhi-kuan, HUANG Yao-wei, et al. Research progress

of comprehensive effect under different rates straw mulch on the rain fed farming areas, China: I. Effect of different rates of straw mulch on farmland ecoenvironment[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(5):63-68.

- [24] 张俊鹏, 孙景生, 刘祖贵, 等. 不同麦秸覆盖量对夏玉米田棵间土壤蒸发和地温的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1):95-100.

ZHANG Jun-peng, SUN Jing-sheng, LIU Zu-gui, et al. Effects of different straw mulching quantity on soil evaporation and soil temperature in summer corn field[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(1):95-100.

- [25] 尚金霞, 李军, 贾志宽, 等. 渭北旱塬春玉米田保护性耕作蓄水保墒效果与增产增收效应[J]. 中国农业科学, 2010, 43(13):2668-2678.

SHANG Jin-xia, LI Jun, JIA Zhi-kuan, et al. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures in spring maize field on Weibei Highland[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2010, 43(13):2668-2678.

- [26] Unger P W. Straw-mulch rate effect on soil water storage and sorghum yield[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1978, 42(3):486-491.