

稻草覆盖对红壤旱地土壤温度和水分的调控效应

苏衍涛^{1,3}, 王凯荣^{1,2}, 刘迎新^{1,3}, 谢小立¹

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410125; 2. 青岛农业大学农业生态与环境健康研究所, 山东 青岛 266109; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:利用雨养玉米田间小区试验,研究了稻草覆盖调节旱地红壤温度和水分动态的作用及其降低玉米干旱胁迫的效应。结果表明,稻草覆盖能显著降低高温时段(15:00)10 cm 以内土层的温度,降幅可达 1.6~4.1 °C,降温效应随覆盖量增加而增加。稻草覆盖能明显提高 0~5 cm 表土层的水分保持能力,当覆盖量为 5 000~10 000 kg·hm⁻² 时,高温干旱期表土层的最低含水量平均可提高 3.3%~3.6%;稻草覆盖量为 15 000 kg·hm⁻² 时,表土层最低含水量平均提高 6.1%。由于稻草覆盖的降温保墒效应,玉米拔节期叶片的光合速率提高了 8.34~17.77 μmol·m⁻²·s⁻¹(提高率 60.3%~128.4%),喇叭口期(雌花发育期)光合速率提高 4.46~11.27 μmol·m⁻²·s⁻¹(提高率 16.3%~41.3%),子粒产量增加 7.6%~13.1%。就土壤降温保墒和玉米增产效应而言,可选择 5 000 kg·hm⁻² 的稻草覆盖量。

关键词: 稻草覆盖;红壤旱地;土壤温度;土壤水分;玉米;光合速率;产量

中图分类号: S152.7, S152.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)02-0670-07

Effects of Rice Straw Mulching on Soil Temperature and Moisture Regulation in an Upland Red Soil

SU Yan-tao^{1,3}, WANG Kai-rong^{1,2}, LIU Ying-xin^{1,3}, XIE Xiao-li¹

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Institute of Agriculture Ecological and Environmental Health, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Based on a field plot experiment of rainfed summer maize, the influences of rice straw mulching on soil temperature, moisture dynamics and reducing drought stress effects of the maize plants were studied in an upland soil derived from the Quaternary red clay earth. Straw mulching could reduce soil temperature significantly within the 10 cm top layer in the high air temperature period (15:00). The extent of reduction ranged from 1.6 °C to 4.1 °C averagely, and the effect of temperature reduction was enlarged with the amount of rice straw mulching increasing. There was also a measurable increase of water holding capacity at the 0~5 cm soil layer in treatments with straw mulching. In the high air temperature and drought period, the lowest content of soil moisture in the 0~5 cm layer increased by 3.3%~3.6% averagely when 5 000~10 000 kg·hm⁻² of rice straw was mulched, while the moisture content increased by 6.1% when amount of straw mulching increased to 15 000 kg·hm⁻² averagely. Because of the effects of straw mulching on decreasing soil temperature and increasing water hold capacity, the photosynthesis rate of the maize plants increased by 4.46~11.27 μmol·m⁻²·s⁻¹ (i.e. 16.3%~41.3%) at the elongation stage, and 4.46~11.27 μmol·m⁻²·s⁻¹ (i.e. 16.3%~41.3%) at the female flower initiation stage, compared with the non-mulching control. And the grain yield increased by 7.6%~13.1% with straw mulching. Considering the acceptable effects on reducing soil temperature and protecting soil moisture, a dose less or more than 5 000 kg·hm⁻² of rice straw could be chosen as mulching of upland soil in the subtropical hilly area of Hunan province.

Keywords: rice straw mulching; upland red soil; soil temperature; soil moisture; maize; photosynthesis rate; yield

在我国亚热带红壤丘陵地区,6—9 月间发生季节性干旱的概率高达 60%^[1]。干旱与干热同步的气候

环境,加之红壤自身调节水分能力弱,使得该区域占总面积近 50% 的旱地农业生产潜力难以正常发挥^[2,3]。如何缓解红壤丘陵区旱坡耕地的季节性干旱胁迫,将区域气候潜力优势转化为现实生产力,是我国农业科技工作者需要关注的重大课题^[4]。

秸秆覆盖作为一种强化土壤有机质积累、调节土壤温度和水分的农艺措施已被广泛应用。与此同时,

收稿日期:2007-06-01

基金项目:中国科学院知识创新工程(KZCX3-SW-441);国际合作 IIRI/BMZ/GTZ 联合资助项目

作者简介:苏衍涛(1979—),男,广东罗定人,硕士,研究方向为农业环境与生态系统管理。

通讯作者:王凯荣 E-mail: krwang@isa.ac.cn

国内外围绕秸秆覆盖的技术原理与效应问题开展了大量的研究工作。现已证实,秸秆覆盖能够影响土壤对光辐射的吸收转化和热量的传导过程。通过覆盖,在地表形成一层与大气热交换的障碍层,既可阻止太阳直接辐射,也可减少土壤热量向大气中散发,同时还有效地反射长波辐射,使得秸秆覆盖具有低温时的“增温”和高温时的“降温”双层效应^[5]。但是,据 Ramakrishna 等的研究,秸秆覆盖主要影响 10 cm 以内浅层土壤的温度,对 10 cm 以下土层温度的调控作用不显著^[6]。综合众多的研究结果,秸秆覆盖处理与对照的温度差可在 0.2~9.3 °C 之间浮动,主要取决于一天内各个时段所受到的气象因素和土壤热量平衡的影响,其中冬季温度差要显著低于夏季的温度差^[6-11]。秸秆覆盖还可以降低高温环境下(特别是伴随水分严重亏缺时)作物对热反应的敏感性^[12]。

秸秆覆盖最主要的保水机理是降低土壤温度^[13]。土壤剖面温度,特别是土壤表面温度显著影响土壤水分的运动行为,如入渗和蒸发过程^[14]。土壤水分损失主要通过植物体蒸腾和棵间蒸发两条途径。秸秆覆盖能有效降低土壤蒸发损失,将非生产性蒸发耗水转为生产性蒸腾耗水,从而提高水分的利用效益^[15,16]。由于覆盖主要能调节表土层的温度,因此其保墒效应也主要体现在土壤表层^[17]。有试验表明,将秸秆覆盖于土壤表面对于提高土壤积蓄水分的效应要明显大于将秸秆翻耕到土壤之中,特别是在降雨量小的情况下,覆盖的保水增水效应更加显著^[18]。此外,通过长期秸秆覆盖,能够促进土壤有机质积累,从而增加土壤水分入渗能力和有效水的库容量^[19,20]。

我国每年生产的农作物秸秆资源量高达 7.95×10^8 t,其中水稻秸秆约为 17.1×10^7 t,88.3%集中在长江以南地区^[21]。由于南方稻田土壤有机质含量普遍达到了 2%~3% 的最适水平^[21],在常规施肥情况下,稻草原位还田的增产率平均低于 5%,农学效益并不显著^[22]。因此,实行稻草易地还土,覆盖旱地作物,不仅能够解决过量稻草资源的利用问题,也可为红壤旱地快速培肥和解决季节性干旱胁迫寻求新的技术途径。本试验主要探讨不同稻草覆盖量对调节红壤旱地土壤温度和水分效应,为有效利用稻草资源,缓解红壤旱地系统季节性干旱胁迫提供科学依据。

1 试验设计与方法

1.1 试验地点

试验于 2006 年在中国科学院桃源农业生态系统

试验站旱地农业生态试验区进行。试验站地处武陵山区向洞庭湖平原过渡的丘岗地带,东经 $111^{\circ}30'$,北纬 $28^{\circ}55'$,海拔 92.2~125.3 m,受中亚热带季风湿润气候控制。年平均气温 16.5 °C,降雨量 1 440 mm,总积温 5 200~5 300 °C。试验地位于试验场一岗地的顶部,不受地下水的影响,供试土壤类型为第四纪红粘土母质发育的腐殖筒育湿润富铁土(粘壤质耕型红壤),实行“玉米-油菜”两熟耕作制。耕层土壤容重 $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,pH 5.1,有机质 $14.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷(P) $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷(Olsen-P) $47.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全 N $1.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,阳离子交换量 $10.1 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验处理设计

设 4 个处理,T1:无稻草覆盖对照;T2:覆盖稻草 $5 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;T3:覆盖稻草 $10 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;T4:覆盖稻草 $15 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。小区面积为 $5.1 \text{ m} \times 9.5 \text{ m}$,3 次重复,随机区组排列。小区之间用 5 cm 厚水泥预制板隔开,预制板地下埋深 20 cm,露头 15 cm。在每个小区的中部埋设中子仪水分探测管,在探测管旁 1 m 处埋设曲管地温表。试验地种植玉米品种为“蠡玉 23 号”,5 月 24 日播种,9 月 6 日收获,行株距 $53 \text{ cm} \times 36 \text{ cm}$,密度为 $51 000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,南北行向。玉米出苗后(6 月 8 日)按处理设计量将原状风干稻草均匀覆盖在各小区内。试验全程雨养,无补充灌溉。

各处理施用等量化肥,即 N $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,P $52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,K $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。肥料品种分别为尿素、过磷酸钙和加拿大红色钾肥。磷、钾肥全部作基肥埋施,氮肥 27%作基肥埋施,其余作追肥分别在玉米 6 展叶期(19%)和 10 展叶期(54%)施用。为防治玉米螟危害,于稻草覆盖前向土壤表面撒施呋喃丹 $28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,在小喇叭口期向玉米植株心部点施呋喃丹,用量为 $35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.3 测定指标与方法

土壤温度:用曲管地温表观测 5、10、15 和 20 cm 4 个层次的土壤温度,观测时间分别为 7:00、11:00、15:00 和 19:00。

土壤含水量:采用土钻采样烘干法测定 0~5 cm,5~10 cm,10~15 cm 和 15~20 cm 4 个土层土壤含水量变化;用 CNC 503dr 中子水分测定仪测定 20~120 cm 土层土壤水分动态,每 20 cm 土层一个读数。

降雨和气温:利用设在试验场内的自动气象观测站采集的气象数据。

玉米光合速率:利用美国产 Li-6400 型便携式光合测定系统测定玉米叶片的光合作用速率。全生育期

共进行4次测定,分别为玉米拔节期(7月3日)、喇叭口期(雌花发育期,7月14日)、灌浆期(8月11日)和成熟期(8月26日)。在玉米拔节期和喇叭口期选择上数第一片全展叶;在灌浆期和成熟期选择穗位叶。每次测定选择3株玉米,测定点为叶片的中上部位,避开中脉。测定时间为下午13:00—16:00之间。

数据采用SPSS软件进行统计分析,数据库管理软件为IBM DB2 Universal Database Express Edition。

2 结果与分析

2.1 试验期间的降水与气温状况

试验期间(玉米生育期内)的降水与日平均气温状况见图1。试验期降雨总天数为42d,占玉米生育期天数的40%,降雨量为496mm,占全年总降水量的36%,相对于往年为丰水年份^[3];有3次连续10d以上总降雨量5mm左右的干旱期,分别为6月25日—7月6日、7月18至27日和8月26日—9月6日。试验期间的日平均温度最高为31.7℃,最低为19.7℃。

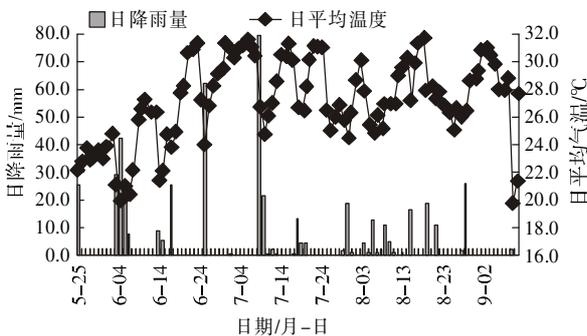


图1 试验期间降雨及日平均气温状况

Figure 1 Status of rainfall and daily mean-temperature during the experiment

2.2 稻草覆盖对土壤温度的影响

表1为试验期间无雨日(早期)不同稻草覆盖量处理区各土层4个时间段的土壤温度平均值。可以看出,在7:00时段,不同稻草覆盖量处理各土层的温度均无显著差异。到11:00时段,5cm和10cm土层土壤温度已明显升高,而15cm和20cm两个土层的温度与7:00时段比升高不明显。5cm和10cm两土层温度上升的速度与稻草覆盖量呈显著负相关,如T1~T4 4处理5cm处11:00时段的土温与7:00时段相比,上升幅度分别为3.5℃、1.9℃、1.6℃和0.9℃;10cm土温上升的幅度分别为1.8℃、0.6℃、0.7℃和

0.3℃。其中对照(T1)5cm处11:00时段的土温显著高于3个覆盖稻草的处理,10cm处土温则显著高出覆盖15000kg·hm⁻²稻草处理。到了15:00时段,土壤温度升至一天中的最高点,覆盖稻草对减缓土壤温度升高的效应在该时段也表现得最为突出,而且降温效应随稻草覆盖量增加显著增强。在5cm和10cm两个土层,覆盖15000kg·hm⁻²稻草处理(T4)的土壤温度显著低于覆盖10000kg·hm⁻²(T3)和5000kg·hm⁻²(T2)处理,而T3和T2处理的土温又显著低于无覆盖对照(T1);在15cm和20cm土层,覆盖稻草处理与无覆盖处理之间的土温差异仍达到显著水平,但3个覆盖量之间的温度差缩小,未达到统计学显著水平。到19:00时段,各土层温度同步回落,处理之间的温度高低排序与15:00时段基本相同。

表1的结果说明,覆盖稻草对0~20cm土层的温度变化都具有调节效应,但影响最大的仍是5~10cm的浅层土壤温度,这与Ramakrishna和Sarkar等的试验结果非常相似^[6,9]。Ramakrishna等的工作还证实,在热带高温环境下,通过秸秆覆盖调节耕作层土壤温度状况,能显著提高作物抵御短期干旱的能力及对土壤水分的利用效率^[6]。在我国江南丘陵区,水稻田每年生产的秸秆干物量(不包括根茬)可达7000~10000kg·hm⁻²,而维持稻田土壤有机质平衡所需要的有机物归还量在2000kg·hm⁻²左右,相当于一般双季稻田常规收割情况下的根茬还田量^[22],因此,利用丰富的稻草资源作为红壤旱地的生物覆盖材料,对缓解旱地作物夏季的高温干旱胁迫、提高旱地系统生产潜力将具有积极意义。

2.3 稻草覆盖对土壤水分动态的影响

2.3.1 土壤含水量变化动态

图2为各覆盖处理0~5cm土层土壤含水量(重量含水量)变化动态。可以看出,无论是否覆盖稻草,表层土壤的水分含量动态变化趋势完全一致,在整体上受制于大气降水过程,但是,覆盖稻草具有明显降低土壤水分变幅的作用。图中3个土壤水分曲线谷值分别由连续8~11d未降雨或降雨总量<5mm并且最高气温达到37.0℃的早期引起,干旱与高温强蒸散过程同步致使土壤含水量急剧降低。在这3个干旱期,0~5cm土壤含水量均以无稻草覆盖对照区最低(水分含量谷值变幅10.6%~13.0%,平均12.0%);覆盖稻草10000kg·hm⁻²(变幅13.7%~15.7%,平均15.3%)与覆盖5000kg·hm⁻²(变幅14.8%~17.6%,平均15.6%)两个处理的土壤含水量相近;覆盖稻草

表 1 不同稻草覆盖量处理 4 个时段各土层温度变化

Table 1 Soil temperature at various layers and time points under different amounts of rice straw mulching

测定时段	土层深度/cm	稻草覆盖处理/℃			
		T1	T2	T3	T4
7:00	5	26.6 a	26.3 a	26.0 a	25.9 a
	10	26.3 a	26.2 a	25.8 a	25.7 a
	15	26.4 a	26.2 a	25.7 a	25.7 a
	20	26.5 a	26.2 a	25.7 a	25.6 a
11:00	5	30.1 a	28.2 b	27.6 b	26.8 b
	10	28.1 a	26.8 ab	26.5 ab	26.0 b
	15	27.4 a	26.2 a	25.6 a	25.7 a
	20	27.4 a	26.0 a	25.4 a	25.5 a
15:00	5	33.1 a	31.0 b	30.2 b	29.0 c
	10	30.8 a	29.2 b	28.9 bc	28.1 c
	15	29.8 a	28.1 b	27.6 b	27.5 b
	20	28.7 a	27.6 b	26.9 b	26.9 b
19:00	5	31.1 a	30.0 b	29.6 b	28.9 c
	10	30.8 a	29.3 b	29.0 bc	28.2 c
	15	30.1 a	28.5 b	28.1 b	27.8 b
	20	29.3 a	28.1 b	27.4 b	27.5 b

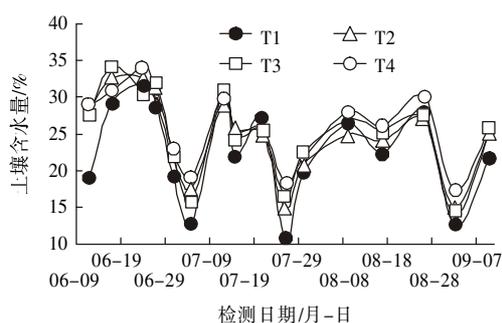


图 2 稻草覆盖对 0~5 cm 土层土壤含水量动态的影响

Figure 2 Soil moisture dynamics at the 5 cm layer as affected by treatments of rice straw mulching

15 000 kg·hm⁻² 处理的土壤含水量最高(变幅 17.3%~19.0%, 平均 18.1%)。

在 5~10 cm、10~15 cm 和 15~20 cm 土层, 土壤水分变化动态与 0~5 cm 土层完全相同, 但是, 随着土层深度增加, 稻草覆盖对土壤水分动态的影响程度随之下降。实际上, 即使在 5~10 cm 土层, 无覆盖对照的土壤水分含量与覆盖稻草处理之间已无显著性差异。此外, 干旱期耕层土壤的最低含水量(谷值)有随土层深度增加而增加的趋势, 0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm 和 15~20 cm 4 个土层各处理 3 个早期的最低平均含水量分别为 14.6%~16.3%、15.9%~18.0%、17.3%~18.2% 和 18.5%~22.4%。Cook 等的试验观测也证实^[8], 干旱季节耕作土壤的含水量在一定范围内随土层深度增加而增加, 而含水量随时间的波动(变幅)随土层

深度增加而缩小。秸秆覆盖能有效增加降水入渗, 但主要影响浅层土壤水分的变化动态^[17]。

采用中子水分测定仪对耕层以下各层土壤(30、50、70、90 和 110 cm)的含水量进行测定发现, 耕层以下各土层的含水量变幅在 0.35~0.42 g·cm⁻³ (相当于重量含水量 23.8%~28.6%) 之间, 无覆盖对照与覆盖稻草处理、以及同一处理各层次之间的含水量都没有显著差异。据中科院桃源农业生态试验站的多点长年监测^[1, 4], 在 6—9 月的夏秋干旱季节, 当红壤旱地耕作土层出现持续干旱时, 由于土壤的非饱和导水率低, 下层土壤水分不能迅速向上层扩散, 使得下层土壤有可能保持相对稳定且含量高于耕作层的水分状况。于舜章、杜新艳等的研究表明^[10, 23], 深层土壤含水量与降雨分布类型和降雨强度密切相关, 在一个气候生态区内, 具有较强的年际变化规律, 地表覆盖对深层土壤水分动态影响相对较小。

2.3.2 土壤含水量对气象因子的响应

在玉米拔节前期, 玉米需水量较小, 且没有形成密闭的冠层结构, 土壤水分的蒸散主要受气象因子的制约。已有研究表明, 土壤含水量本身、水分迁移过程的土壤阻力、空气动力学阻力、风速、近地层大气与地表面的饱和水汽压差、太阳辐射等因子都会影响土壤水分的蒸散过程^[5, 10, 24]。假定各种气象因子对土壤水分蒸散作用具有累加效应, 则可以用各气象因子的累加值作为指标评价气象环境对土壤水分变化的影响。在

本试验中, 我们利用7月3日前0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm和15~20 cm 4个层次的土壤水分含量数据与7个气象要素构建数据库, 进行了Neural Network Classification分析, 以揭示红壤旱地土壤水分含量变化对气象因子的响应和稻草覆盖的影响度。数据库选用参数见表2。

根据各因子在Classification Function中的重要性进行敏感性等级划分。模型分析中的各因子敏感性分级结果见表3。

从表3结果可知, 在玉米生长前期, 地表还没有被玉米冠层完全覆盖的情况下, 对红壤旱地耕层土壤水分含量影响最大的因子是稻草覆盖处理, 土壤水分含量变化对稻草覆盖因子的敏感度(关联性)与土壤层次因子相近, 大大高于对各种气象要素的敏感度。这是因为稻草覆盖有效削减了太阳辐射对表层土壤的增温效应, 降低了土壤水分蒸发势, 因而对土壤水分的影响表现得比气象因子的影响大。在分析的7种气象要素中, 净辐射、反射和总辐射对土壤水分含量的影响相对较大。一般认为, 土壤温度与土壤水分蒸发过程有密切的相关性, 在大田环境下, 土壤温度是太阳辐射平衡、土壤热量平衡和土壤热学性质共同作用的结果, 秸秆覆盖改变了光辐射吸收转化和热量传导过程, 主要是降低了土壤接收的辐射能量, 致使土壤表层白昼的升温过程减缓, 高温峰值降低, 从而减

少了土壤水分的损失^[5,8,10,17]。

2.4 稻草覆盖对玉米光合速率和产量的影响

在干旱胁迫下, 植物的生理代谢和生长过程都将发生显著变化^[25]。本试验以玉米叶片的光合速率为参数, 测定稻草覆盖措施对缓解玉米高温干旱胁迫的效应, 结果列于表4。

在拔节期(7月3日), 覆盖稻草处理玉米叶片的光合速率比无覆盖对照提高了60.3%~128.4%, 达到显著水平, 其中覆盖15 000 kg·hm⁻² 稻草处理(T4)的效果又显著优于覆盖5 000 kg·hm⁻² (T2)和10 000 kg·hm⁻² 处理(T3)。在雌花发育的喇叭口期(7月14日), 覆盖稻草处理玉米光合速率比对照提高16.3%~42.3%, 虽然提高的幅度小于拔节期, 但处理之间的差异均达到了显著水平。喇叭口期稻草覆盖所带来的玉米光合促进效应下降的原因, 可能与7月7日的降水过程(日降雨量79.4 mm)缓解了土壤和作物的干旱胁迫有关(见图1、2)。到了灌浆期(8月11日)和成熟期(8月26日), 覆盖稻草的玉米光合速率与对照的差异进一步缩小, 处理之间的差异在统计学上已无显著性(表4)。其原因可能是, 玉米进入灌浆期以后, 冠层叶片已完全覆盖了裸露的地表, 稻草覆盖在降温保墒方面的直接效应随之削弱, 处理之间的土壤水分差异缩小(图2), 此时对玉米光合作用产生影响的主要是植株生长的健康水平和天气状况。无稻草覆盖的玉

表2 聚类分析数据库字段细节

Table 2 Field names' details in classification analysis database

字段名	单位	参数描述	数据类型
STRAWCOVER	无量纲	稻草覆盖量类别	Categorical
DEPTH	无量纲	土层深度层次类别	Categorical
DIFF	%	土壤水分变化值	Continuous
TEMPERATURE	℃	气温累计值	Continuous
EG	MJ·m ⁻²	总辐射累计值	Continuous
ER	MJ·m ⁻²	反射累计值	Continuous
EN	MJ·m ⁻²	净辐射累计值	Continuous
TD	℃	露点温度累计值	Continuous
RH	%	相对湿度累计值	Continuous
WIND	M·s ⁻¹	2 min 平均风速累计值	Continuous

表3 字段敏感性分析报告

Table 3 Field names' sensitivity report in classification analysis

字段名	敏感度	字段名	敏感度
STRAWCOVER	29.6	WIND	3.0
DEPTH	28.0	TEMPERATURE	2.8
EN	7.5	TD	1.8
ER	6.3	RH	1.5
EG	5.4		

表4 稻草覆盖对提高红壤旱地夏玉米光合同化速率的效应/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

Table 4 Effect of straw mulch on photosynthesis rate of the summer-sowed maize in the upland red soil

处理	测定时期			
	拔节期 (7月3日)	喇叭口期 (7月14日)	灌浆期 (8月11日)	成熟期 (8月26日)
T1	13.84 c	27.30 d	24.93 a	20.31 a
T2	22.18 b	31.76 c	23.33 a	23.71 a
T3	23.51 b	34.03 b	26.35 a	22.94 a
T4	31.61 a	38.57 a	25.07 a	23.48 a

注:同一列中标注相同字母的数值间差异未达到5%的统计显著性(Duncan's test)。

Note: Within columns, means followed by the same letter are not significantly different according to Duncan's test (0.05)。

米植株前期的生长势相对较弱,对后期植株的健康水平也会造成积累性影响,但8月份以后的几个小降雨过程,缓解了高温干旱的环境胁迫(图1),促进了玉米的自我恢复过程,一个突出的表现是叶片光合功能的修复和补偿。

光合作用是作物产量形成的物质基础,禾谷类作物中、后期的光合效能更与子粒产量高低密切相关^[25]。从图3结果可知,在没有覆盖稻草的对照区(T1),玉米子粒产量为 $3\ 678\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;覆盖不同量稻草的处理(T2、T3和T4),玉米产量分别为 $4\ 231$ 、 $3\ 957$ 和 $4\ 158\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,增产率达7.6%~13.1%,尽管由于土壤的异质性加大了试验误差,致使处理之间的产量差异未能达到统计学显著水平(图3)。另外,相对常年丰沛的降雨条件也缓解了季节性干旱胁迫,使无覆盖对照的玉米产量维持了较高水平。已有研究发现,秸秆覆盖的增产效应与土壤类型、降雨及蒸散环境有关,干旱胁迫越严重,秸秆覆盖的增产效应越大。在土壤墒情好,或非完全雨养的情况下,秸秆覆盖的增产效应将变得不显著^[23,26,27]。不过,应该指出的是,我国江南丘陵旱地农业除了受季节性干旱影响之外,红壤自身的不良特性,如粘板性、低pH、铝毒和养分匮乏

等都严重阻碍着作物产量的提高^[4,28]。秸秆覆盖通过强化红壤有机质积累,改善土壤理化性能,不仅能提高土壤的蓄水、保水性能,也将改善土壤的肥力性能和作物生长环境。因此,稻草异地还土覆盖的长期效应将远不止单一的降温保墒作用。

3 结论

在亚热带红壤丘陵区,稻草覆盖能有效调节旱地土壤耕作层(0~20 cm)的温度变化,尤其是显著降低高温时段(15 pm)10 cm以内土层的温度水平。本试验中,覆盖稻草处理5 cm土层的温度降低了2.1~4.1℃,10 cm土层降温幅度为1.6~2.7℃,降温效应随稻草覆盖量增加而增加(表1)。稻草覆盖对土壤水分动态的调控效果主要体现在0~5 cm的表土层,当稻草覆盖量为 $5\ 000\sim 10\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,高温干旱期表层土壤的最低含水量平均可提高3.3%~3.6%(绝对量,下同);当稻草覆盖量增加至 $15\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,表层土壤最低含水量平均可提高6.1%(图2)通过稻草覆盖调节土壤温度和水份动态,可有效降低高温干旱对红壤旱地玉米的生理伤害作用,显著提高玉米的光合同化速率,增加玉米子粒产量 $279\sim 553\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,增产率7.6%~13.1%。我国红壤丘陵区双季稻田秸秆的年生产量可达 $7\ 000\sim 10\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,可全部异地还土,充分发挥其培肥旱地红壤和增强旱作农业系统抵御季节性干旱胁迫能力的双层效应^[22]。就其对土壤的降温保墒和玉米增产效应而言,覆盖稻草量 $5\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 可达到良好的效果。

参考文献:

- [1] 黄道友,王克林,黄敏,等.我国中亚热带典型红壤丘陵区季节性干旱[J].生态学报,2004,24(11):2516-2523.
- [2] 王明珠.我国南方季节性干旱研究[J].农村生态环境,1997,13(2):6-10.

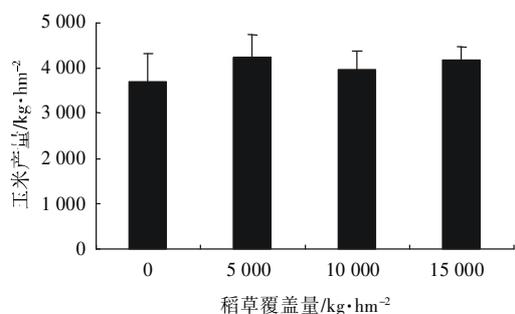


图3 不同稻草覆盖量处理对玉米子粒产量的影响

Figure 3 Effect of rice straw mulching on the grain yield of maize

- [3] 谢小立,王凯荣. 环洞庭湖丘岗地区水资源平衡及其管理[J]. 水土保持学报, 2001,15(4): 92-95.
- [4] 王凯荣,谢小立,周卫军,等. 红壤丘岗坡地农业开发利用的问题与对策[J]. 农业环境保护, 2000,19(5): 278-281.
- [5] Sauer T J, Hatfield J L, Prueger J H, et al. Surface energy balance of a corn residue-covered field [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 89: 155-168.
- [6] Ramakrishna A, Tam H M, Wani S P, et al. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam [J]. *Field Crops Research*, 2006, 95: 115-125.
- [7] Roberts S D, Harrington C A, Terry T A. Harvest residue and competing vegetation affect soil moisture, soil temperature, N availability, and douglas-fir seedling growth [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 205: 333-350.
- [8] Cook H F, Valdes G S B, Lee H C. Mulch effects on rainfall interception, soil physical characteristics and temperature under *Zea mays* L. [J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 91: 227-235.
- [9] Sarkar S, Singh S R. Interactive effect of tillage depth and mulch on soil temperature, productivity and water use pattern of rainfed barley (*Hordium vulgare* L.) [J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 92: 79-86.
- [10] 杜新艳,杨路华,脱云飞,等. 秸秆覆盖对夏玉米农田水分状况、土壤温度及生长发育的影响[A]. 中国农业工程学会 2005 年学术年会. 广州: 华南农业大学出版社, 2005. 213-215.
- [11] 李洪勋,吴伯志. 地膜和秸秆覆盖对夏玉米的调温保墒效应[J]. 玉米科学, 2006,14(3): 96-98.
- [12] Badaruddin M, Reynolds M P, Ageeb O A A. Wheat management in warm environments: effect of organic and inorganic fertilizers, irrigation frequency, and mulching [J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91: 975-983.
- [13] 李全起,陈雨海,于舜章,等. 灌溉条件下秸秆覆盖麦田耗水特性研究[J]. 水土保持学报, 2005,19(2): 130-132,141.
- [14] 蔡树英,张瑜芳. 温度影响下土壤水分蒸发的数值分析[J]. 水利学报, 1991, 11: 1-8.
- [15] 晋凡生,李素玲,萧复兴,等. 旱源地玉米耗水特点及提高水分利用效率途径[J]. 华北农学报, 2000, 15(1): 76-78.
- [16] 张海林,陈 阜,秦耀东,等. 覆盖免耕夏玉米耗水特性的研究[J]. 农业工程学报, 2002,18(2): 36-40.
- [17] Olasantan F O. Effect of time of mulching on soil temperature and moisture regime and emergence, growth and yield of white yam in western Nigeria[J]. *Soil & Tillage Research*, 1999, 50: 215-221.
- [18] Shangning J, Unger P W. Soil water accumulation under different precipitation, potential evaporation, and straw mulch conditions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65: 442-448.
- [19] 曾木祥,王蓉芳,彭世琪,等. 我国主要农区秸秆还田试验总结[J]. 土壤通报, 2002,33(5): 336-339.
- [20] 李雪转,樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006,22(3): 188-190.
- [21] 林心雄. 中国土壤有机质状况及其管理[M]. 见: 沈善敏主编. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社, 1998. 111-159.
- [22] 王凯荣,刘 鑫,周卫军,等. 稻田系统养分循环利用对土壤肥力和可持续生产力的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004,23(6): 1041-1045.
- [23] 于舜章,陈雨海,周勋波,等. 冬小麦期覆盖秸秆对夏玉米土壤水分动态变化及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2004,18(6):175-178.
- [24] 刘昌明,王会肖. 土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [25] 徐世昌,戴俊英. 水分胁迫对玉米光合特性及产量的影响[J]. 作物学报, 1995,21(3): 356-363.
- [26] Tolk J A, Howell T A, Evett S R. Effect of mulch, irrigation, and soil type on water use and yield of maize [J]. *Soil & Tillage Research*, 1999, 50: 137-147.
- [27] 杜守宇,田恩平,温 敏,等. 秸秆覆盖还田的整体功能效应与系列化技术研究[J]. 干旱地区农业研究, 1994,12(2): 88-94.
- [28] 吕焕哲,王凯荣,谢小立,等. 施用水稻秸秆对酸性红壤铝形态的动态影响[J]. 水土保持学报, 2006,20(4): 110-119.
- [29] Wang Kairong, et al. Residue management for improving soil fertility and sustainable crop productivity in China[C]//IRRI and ICAR (ed.). Abstracts of the 26th International Rice Research Conference. New Delhi, India. Oct. 2006. 52-53.