

红壤旱地稻草覆盖对夏玉米抗旱性的影响*

高雪涛^{1,2} 王卫^{1,3} 谢小立^{1,3**} 尹春梅^{1,3} 陈安磊^{1,3}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所 亚热带农业生态过程重点实验室 长沙 410125;
2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 中国科学院桃源农业生态试验站 桃源 415700)

摘要 为了探明不同稻草覆盖量对红壤夏玉米地抗旱性的影响, 2006—2012年, 以不覆盖为对照(CK), 在中国科学院桃源农业生态试验站设置3个水平稻草覆盖量: 5 000 kg·hm⁻² (T1)、10 000 kg·hm⁻² (T2)和15 000 kg·hm⁻² (T3), 调查各处理的土壤水分、夏玉米生长和光合性能, 以及玉米产量与干旱程度的相关性。结果表明, 稻草覆盖提高表层土壤(0~20 cm)总有效水含量, T1、T2、T3与CK相比分别提高6.8%、19.3%($P>0.05$)和28.4%($P<0.05$)。光合速率灌浆期T1、T2、T3比CK分别提高24.1%、40.3%、53.8%, 成熟期分别提高20.0%、40.3%、37.9%。研究发现, 生育期旬干旱发生比率为18.2%, 覆盖处理与对照之间产量无显著差异; 发生比率为18.2%~63.6%时, 玉米产量差异显著($P<0.05$); 发生比率为18.2%~36.4%时, T1产量最大, 而在54.5%时, T3产量最大; 2011年发生比率为63.6%, 超出了稻草覆盖抗旱范围。综合考虑稻草利用效率和平均抗旱能力, 本研究建议在红壤丘陵区旱地5 000 kg·hm⁻²的稻草覆盖量较适宜。

关键词 稻草覆盖 季节性干旱 土壤有效水含量 光合性能 玉米产量

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2013)10-1193-09

Effect of straw mulching on drought resistance of summer maize in upland red soils

GAO Xue-Tao^{1,2}, WANG Wei^{1,3}, XIE Xiao-Li^{1,3}, YIN Chun-Mei^{1,3}, CHEN An-Lei^{1,3}

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Chinese Academy of Sciences; Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Taoyuan Experimental Station of Agricultural Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Taoyuan 415700, China)

Abstract An upland red soil experiment was conducted from 2006 to 2012 to determine the effects of rice straw mulching on seasonal drought resistance of summer maize. The study was conducted at the Taoyuan Agro-ecological Experimental Station of Chinese Academy of Sciences, Hunan Province, China. Rice straw was applied at the rates of 0 (CK), 5 000 kg·hm⁻² (T1), 10 000 kg·hm⁻² (T2) and 15 000 kg·hm⁻² (T3) in field plots. The results showed that compared with CK (control), total soil available moisture in T1, T2 and T3 increased by 6.8% ($P > 0.05$), 19.3% ($P > 0.05$) and 28.4% ($P < 0.05$), respectively. In 2012, maize photosynthetic rate at filling stages in T1, T2 and T3 respectively increased by 24.1%, 40.3% and 53.8%. Also T1, T2 and T3 were respectively higher in photosynthetic rate than CK by 20.0%, 40.3% and 37.9% at maturity stage. At drought occurrence rate of 18.2% per ten days, there was no significant difference in maize yield between rice straw mulching and CK. Yield difference was significant ($P < 0.05$) when drought occurrence rate was 18.2%~63.6% per ten days. When drought occurrence rate was 18.2%~36.4% per ten days, T1 had the maximum yield. When drought occurrence rate reached 54.5% per ten days, T3 produced the maximum yield. When drought occurrence rate exceeded 63.6% per ten day, rice straw mulching was no longer suitable for resisting drought. The recommended amount of straw mulch in the southern hilly red soils was 5 000 kg·hm⁻².

Key words Rice straw mulching, Seasonal drought, Soil available moisture, Photosynthetic rate, Maize yield

(Received Jan. 29, 2013; accepted May 29, 2013)

* 国际科技合作与交流专项(2012DFB30030)资助

** 通讯作者: 谢小立(1958—), 男, 研究员, 主要从事区域农业生态系统管理研究。E-mail: xlx@isa.ac.cn

高雪涛(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为农田生态系统过程与管理。E-mail: yifei228801@163.com

收稿日期: 2013-01-29 接受日期: 2013-05-29

南方红壤丘陵旱地夏、秋季节性干旱发生原因主要是夏、秋季蒸发量大,降雨却偏少,以及红壤有效库容偏小^[1]。夏、秋季节性干旱造成该区域占总面积近 50%的旱地农业生产潜力难以正常发挥^[2]。南方丘陵地区稻草资源丰富,大量未被利用的稻草就地丢弃或者焚烧,既浪费了大量农业有机资源又污染了环境^[3]。稻草覆盖不仅可以减少空气污染和土壤有机质的损失,而且有利于水分保持和产量提升^[4]。王爱玲等^[5]进行了秸秆焚烧和还田效应比较研究。胡实等^[6]、Balwinder 等^[7]指出稻草覆盖通过抑制午间高温时段的强烈土壤蒸发,减少了土壤棵间蒸发,提高了作物蒸腾量。Zhang 等^[8]指出无论晴天或多云秸秆覆盖下的土壤都能够吸附更多的水蒸气或聚集较多的冷凝水。张俊鹏等^[9]指出秸秆覆盖提高夏玉米的灌浆速率和水分利用效率。总之,秸秆覆盖通过提高土壤表层含水量从而达到保墒的节水效应。

前人研究表明,秸秆还田后提高了土壤有效水含量^[10]和土壤持水性能^[11]。于晓蕾等^[12]、刘超等^[13]在陕西省杨凌区研究认为 6 000 kg·hm⁻² 为适宜覆盖量。蔡太义等^[14]在陕西省合阳县,高铁等^[15]在宁南旱区的研究认为 9 000 kg·hm⁻² 覆盖量为宜。秸秆覆盖在干旱年还是丰水年均有储水保墒效果,干旱年显著,丰水年不显著^[16]。然而这个结果都是干旱半干旱区的研究结果,针对南方本身不缺水,但夏秋季节季节性干旱较严重而且变异较大的地区如何确定秸秆适宜覆盖量呢?仅从整年或整个生育期较大时间尺度判定的干旱程度,无法准确估计季节性干旱的实际干旱程度。因此本研究基于不同干旱程度(2006—2012 生产年度)进行不同稻草覆盖量对夏玉米产量影响的长期定位试验,

为解决南方丘陵地区夏秋季节性干旱和秸秆生态利用提供理论指导和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验位于中国科学院桃源农业生态试验站宝洞峪试验场(111°27'E, 28°55'N, 海拔 100 m)。该区域年均气温 16.5 , 年降雨量 1 440 mm, 土壤类型为第四纪红土发育的红壤。试验前表层土壤的基本理化性质为:有机质 14.6 g·kg⁻¹, 全氮 1.1 g·kg⁻¹, 全磷 0.5 g·kg⁻¹, 有效磷(Olsen-P)11.2 mg·kg⁻¹, pH 4.34。

1.2 试验设计

在 2006—2012 年进行夏玉米生产试验,以不覆盖为对照(CK),共设置 3 个稻草覆盖量处理:5 000 kg·hm⁻²(T1)、10 000 kg·hm⁻²(T2)、15 000 kg·hm⁻²(T3),随机区组排列,每处理重复 3 次。其中 3 个稻草覆盖量分别代表单季稻稻草量、双季稻稻草量、加倍稻草量。各小区面积为 48.195 m² (5.1 m×9.45 m),重复之间用水泥板构建宽 25 cm、深 20 cm 的排水沟相隔离,水泥板垂直埋深 20 cm。

采用稻草替代部分肥料,施肥情况见表 1。各小区总养分一致。肥料品种分别为尿素(N 含量 46.4%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12.0%)和氯化钾(含 K₂O 60.0%)。磷钾肥全部作基肥埋施,27.4%的氮肥作基肥埋施,其余氮肥做追肥,分别在玉米 6 叶期(18.8%)和 10 叶期(53.8%)施用。将原状稻草(风干)在 10 叶期施肥之后一次性覆盖于地表。常规耕作管理,玉米全生育期不灌溉。

表 1 试验处理的养分投入情况

Table 1 Nutrient inputs of different treatments in the field experiment

kg·hm⁻²

试验处理 Treatment	稻草覆盖量 Rice straw mulching rate	N		P		K	
		稻草投入量 Straw inputs	化肥使用量 Fertilizer input	稻草投入量 Straw inputs	化肥使用量 Fertilizer input	稻草投入量 Straw inputs	化肥使用量 Fertilizer input
CK	0	0	240.0	0	52.4	0	286.4
T1	5 000	43.2	196.8	2.9	49.5	95.5	190.9
T2	10 000	86.5	153.5	5.8	46.6	190.9	95.5
T3	15 000	129.8	110.2	8.7	43.7	286.4	0

种植制度为玉米-油菜一年两熟制。供试玉米品种为“鑫玉 23 号”,根茬保留在小区之内,其余生物量全部移出小区。玉米于 5 月底—6 月初进行人工穴播,种植密度为 51 000 株·hm⁻²,9 月中旬收获。

1.3 测定项目及方法

蒸发入渗量:于 2012 年覆盖前期(6 月 30 日—7 月 1 日)和覆盖中期(7 月 20—22 日)采用自制的小型蒸渗仪(直径 10 cm、高 15 cm 的 PVC 管制成,表面积 78.5 cm²)在白天(d)和夜晚(n)两个时间段进行观测。

土壤温度:于 2012 年 8 月 8 日采用地温计 24 h

观测(观测土层为 0、5 cm、10 cm、15 cm 和 20 cm)。

土壤体积含水量:利用中子仪结合土壤烘干法测定,在 0~50 cm 时,10 cm 为一层,50~170 cm 时 20 cm 为一层。10 d 测定一次,如遇雨天可推迟或提前,期间测定一个降雨前后的土壤含水量变化。

土壤水分特征常数:采用离心机法测定,在油菜收割前的 2012 年 5 月 20 日采集 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的土样,每个小区取 2 个平行。离心机测定不同土壤水势(0 MPa、0.001 MPa、0.003 MPa、0.02 MPa、0.06 MPa、0.1 MPa、0.4 MPa、0.8 MPa、1 MPa)

的土壤质量含水量, 调用 Matlab 的 Lsqcurvefit 函数进行 VG 模型参数求解, 拟合并计算出不同 bar 下的土壤水分常数^[17-18]。饱和含水量、田间持水量和萎蔫含水量分别为: 0 MPa、0.03 MPa、1.5 MPa。总有效水为毛管含水量(0.01 MPa)与萎蔫含水量的差值, 易有效水为毛管含水量与田间持水量的差值, 难有效水为田间持水量与萎蔫含水量的差值^[11]。

光合作用: 在 2012 年的灌浆期(7 月 27 日)和成熟期(8 月 19 日)的 9:00—11:00 利用 Li-6400 型便携式光合测定系统测量玉米穗上 3 叶的光合速率 [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]、蒸腾速率 [$\mu\text{mol}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] 和气孔导度 [$\text{mol}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]。叶绿素采用 SPAD 在傍晚无阳光照射情况下测定。

1.4 数据统计与计算方法

土壤蓄水量计算公式^[19]如下: $SWS = \sum V_i \times H_i$, 其中, SWS 为土壤蓄水量(mm), H_i 为 i 层土壤深度(mm), V_i 为 i 层土壤体积含水量($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)。

蒸发降雨比: 利用试验站气象场进行生育期降水量(P)和蒸发量(E)的记录值, 通过公式 E/P 计算得出生育期蒸发降雨比。

干旱次数: 利用相对湿润度指数 $M=(E-P)/E$, 计算 M 值, 其中 $|M|>0.4$ 视为干旱。玉米生育期为 6 月上旬到 9 月中旬, 共 11 旬。生育期干旱发生比率为生育期发生干旱的旬次数占生育期总旬数的比例。旬干旱发生比率= $N/11$, 其中 N 为夏玉米生育期发生干旱的旬次数。

干旱程度: 干旱程度=发生干旱次数+每次累积干旱程度, 其中每次累积干旱程度= $|M|-0.4$ 。

采用 Excel 2010 进行基础数据分析。使用 SPSS 19.0 进行差异显著性分析和二次多项式拟合。

2 结果与分析

2.1 稻草覆盖对土壤水分、土壤温度的影响

稻草覆盖降低白天表层土壤(0~20 cm)温度(图 1), 与对照相比, 午间温度出现显著降低现象。稻草覆盖能够促使土壤温度日变化平缓, 降低温度波动, 大致规律是随着覆盖量增加温度波动幅度逐渐减缓。蒸发量和入渗量均随着稻草覆盖量增加而减少, 白天蒸发量大于晚上蒸发量(6 月 30 日, 图 2)。

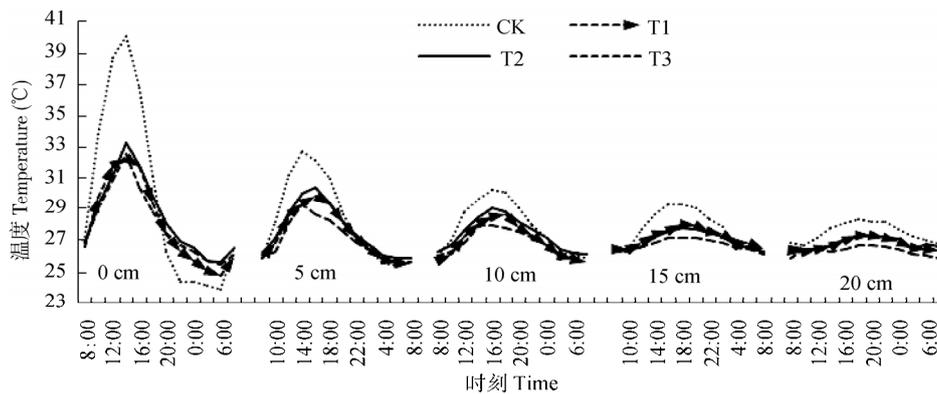


图 1 稻草覆盖对夏玉米田土壤温度日变化的影响(8 月 8 日)

Fig. 1 Diurnal variation of soil temperature of summer maize field under rice straw mulching on August 8

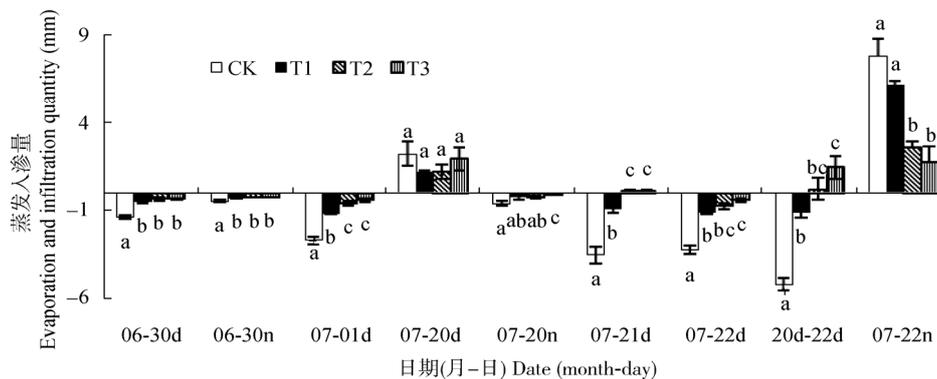


图 2 稻草覆盖对夏玉米田土壤蒸发入渗量的影响

Fig. 2 Effect of rice straw mulching on soil evaporation and infiltration losses of summer maize field

图中数值>0 为入渗, <0 为蒸发。d 指白天, n 指夜晚。7 月 20 日下午降雨 4.8 mm, 22 日晚到 23 日早降雨 12.6 mm。In the figure, the data greater than zero indicates infiltration, and less than zero indicates evaporation. “d” refers to the daytime, “n” refers to the night. Rainfall was 4.8 mm on the afternoon of July 20. From the night of July 22 to the morning of July 23, rainfall was 12.6 mm. 采用 Duncan 法进行显著性方差分析, 图中不同小写字母代表 5% 水平差异显著。下同。Duncan method is used for significant variance analysis. Different letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

从 7 月 20 日白天到 7 月 22 日白天一个降雨过程 (20~22 d)可以看出, CK 和 T1 为蒸发过程, 且蒸发量 $CK>T1$; T2 和 T3 为入渗过程且入渗量 $T3>T2$ 。土壤温度越高蒸发量越大, 稻草通过降低土壤温度及其覆盖后对土壤蒸发的阻滞作用共同降低了土壤蒸发。

由图 3 可以看出, 土壤蓄水量(0~170 cm)大致规律是 $T1>T2>T3>CK$, 土壤体积含水量随着土壤

深度的增加而增加。9 月 2 日降雨量为 21.5 mm。总蓄水量: 9 月 3 日雨后第 1 d 总蓄水量 T1 最大, 9 月 4—7 日 T2 最大。9 月 1—7 日(降雨前后)10 cm 和 20 cm 土壤体积含水量表现为 T1 最高。30 cm 土壤体积含水量一直处于 $0.32(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$ 以上, 雨前 T2 最大, 雨后前两天 CK 最大。8 月 15 日体积含水量很低是由于在 8 月 5 日降雨后直到 8 月 15 日一直未下雨, 而且每天都有 30°C 以上的高温, 蒸发很大。

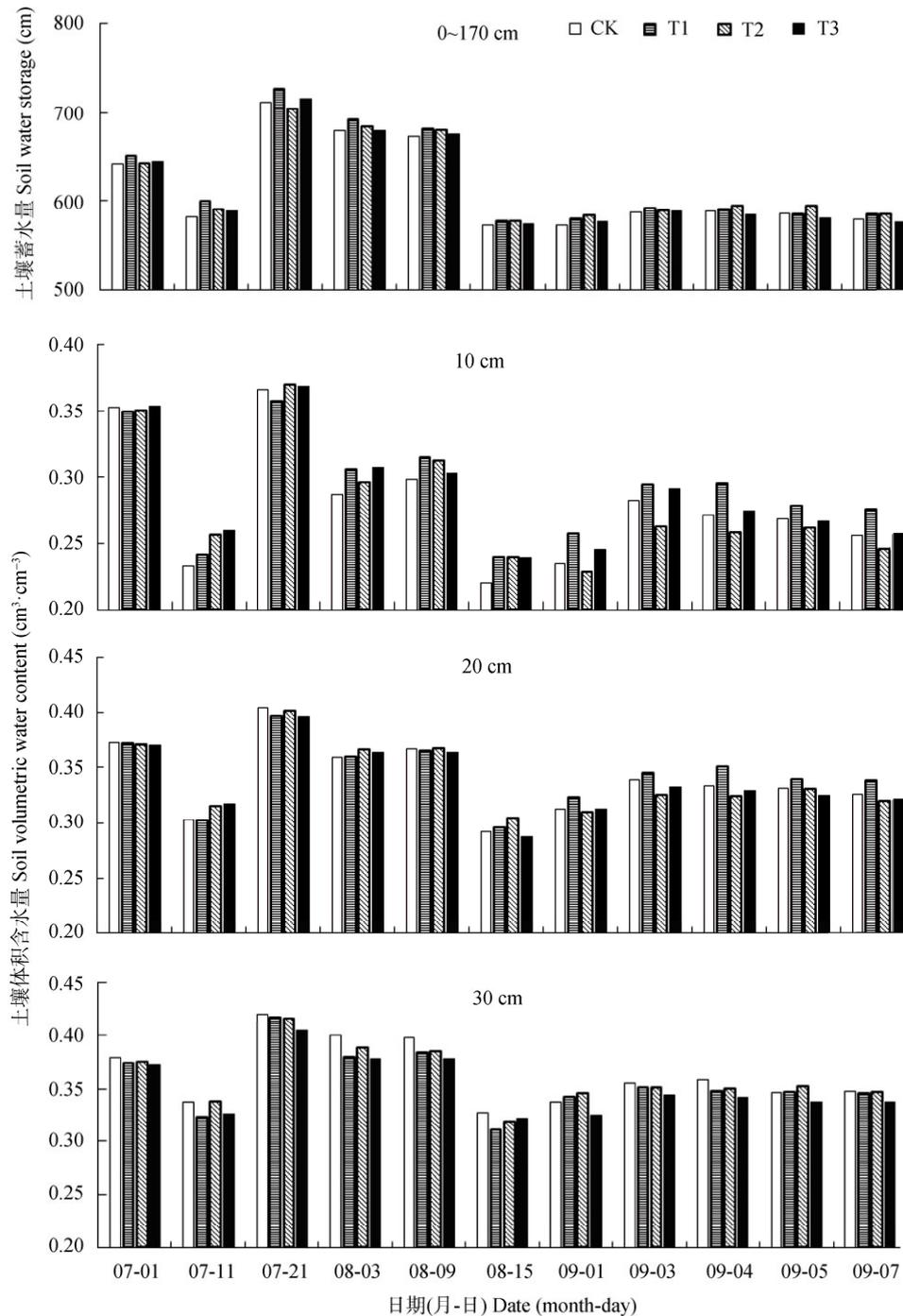


图 3 稻草覆盖对夏玉米田土壤水分动态的影响(2012 年)

Fig. 3 Effect of rice straw mulching on soil moisture dynamic changes of summer maize field in 2012

由表 2 可知, 0~20 cm 土层总有效水、易有效水、难有效水含量均随覆盖量增加而增加, T3、T2 与 CK 之间差异均达到显著水平, T1 与 CK 之间差异不显

著。T2 和 T3 的总有效水比 CK 分别提高 19.3%和 28.4%, 易有效水分别提高 21.9%和 29.7%, 难有效水比 CK 分别提高 13.4%和 25.4%。

表 2 稻草覆盖对夏玉米田土壤水分特征常数的影响

深度 Depth (cm)	处理 Treatment	饱和含水量 Saturation moisture content	田间持水量 Field capacity	萎蔫持水量 Wilting water level	易有效水含量 Readily available water content	难有效水含量 Slowly available water content	总有效水含量 Total available water content
0~20	CK	33.86±1.64a	28.32±1.30a	18.25±0.44a	8.71±1.13c	3.83±0.57c	12.54±1.57b
	T1	36.74±2.25a	28.19±0.95a	17.85±1.72a	9.55±0.27bc	3.85±0.51bc	13.40±1.78b
	T2	36.53±2.59a	29.22±1.04a	17.47±1.27a	10.62±1.06ab	4.34±0.37ab	14.96±1.38ab
	T3	35.00±1.95a	29.65±0.94a	16.55±0.85a	11.30±0.05a	4.80±0.29a	16.10±1.18a
20~40	CK	29.49±1.80a	28.87±1.55a	22.00±1.68a	4.33±0.23a	4.75±0.48a	9.09±1.28a
	T1	27.94±1.28a	27.01±1.59a	17.07±2.21a	5.56±0.90a	5.03±0.84a	10.60±1.83a
	T2	28.52±1.65a	27.24±1.92a	17.23±3.58a	6.14±3.30a	4.76±0.82a	10.90±3.51a
	T3	28.79±1.71a	27.73±1.12a	18.20±1.70a	5.68±1.30a	4.58±0.82a	10.26±1.41a

4 个处理的饱和含水量、易有效水含量和总有效水含量均呈 0~20 cm 大于 20~40 cm 的规律, 稻草覆盖对表层土壤持水能力影响较大。长期稻草覆盖能够提高红壤有效水含量, 原因可能是稻草覆盖增加了表层土壤有机质含量(图 4), 提高了土壤毛管孔隙含量, 降低了容重^[11]。

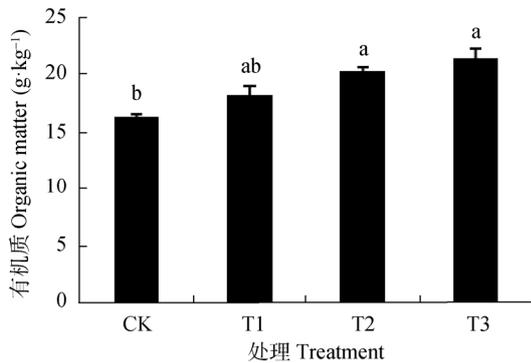


图 4 稻草覆盖对夏玉米田土壤表层有机质含量的影响
Fig. 4 Effect of rice straw mulching on surface soil organic matter content of summer maize field in 2012

稻草覆盖通过降低温度和土壤蒸发提高土壤含水量和蓄水量, 长期稻草覆盖能够提高红壤耕层有效水含量, 通过长期和短期覆盖效应增加红壤夏玉米田土壤的持水和保水能力。

2.2 稻草覆盖对玉米生长及其光合性能的影响

抽穗期株高 4 个覆盖处理间差异显著(图 5), 3 个时期的株高以及穗位高均是 T3>T2>T1>CK, 3 个时期的株高和穗位高均呈现 T3、T2 与 CK 显著差异的规律。

灌浆期的光合速率 T3 和 T2 与 T1、CK 有显著差异, T1 与 CK 有显著差异(图 6), T1、T2、T3 比 CK 分别提高 24.1%、40.3%、53.8%, 成熟期分别提

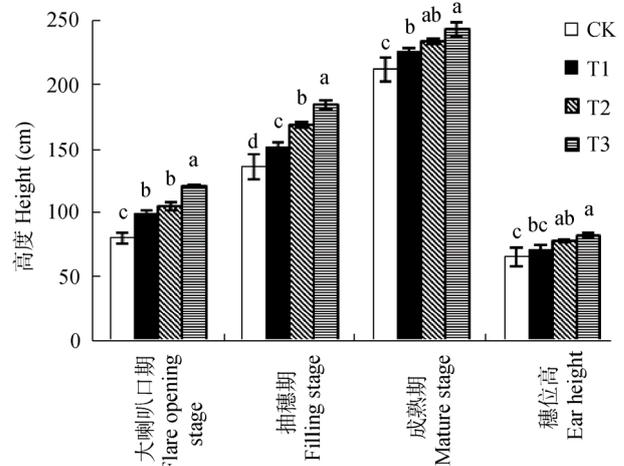


图 5 稻草覆盖对夏玉米株高、穗位高的影响
Fig. 5 Effect of rice straw mulching on summer maize plant height and ear height

高 20.0%、40.3%、37.9%。灌浆期气孔导度 T1、T2、T3 比 CK 分别提高 73.6%、133.1%、148.3%, 成熟期分别提高 25.5%、56.5%、44.7%。灌浆期蒸腾速率 T1、T2、T3 比 CK 分别提高 72.9%、144.1%、136.6%, 成熟期分别提高 16.2%、47.1%、32.6%。成熟期、灌浆期叶绿素 T3>T2>T1>CK, 灌浆期 T1、T2、T3 比 CK 分别提高 27.75%、31.3%、36.5%, 成熟期分别提高 15.1%、19.5%、32.0%。

在玉米灌浆期以前, 由于玉米叶面积指数小, 因此覆盖与不覆盖之间光合速率、蒸腾速率、气孔导度和叶绿素含量差异较大。成熟期的光合速率、蒸腾速率和气孔导度都是处理 T2 最高。稻草覆盖对玉米光合性能有明显促进作用, 叶绿素的含量越多, 光合速率越强, 气孔导度与光合速率呈正相关。稻草覆盖与对照相比株高和光合生理指标都有所提高, 反映出稻草覆盖缓解红壤旱地干旱的正效应。

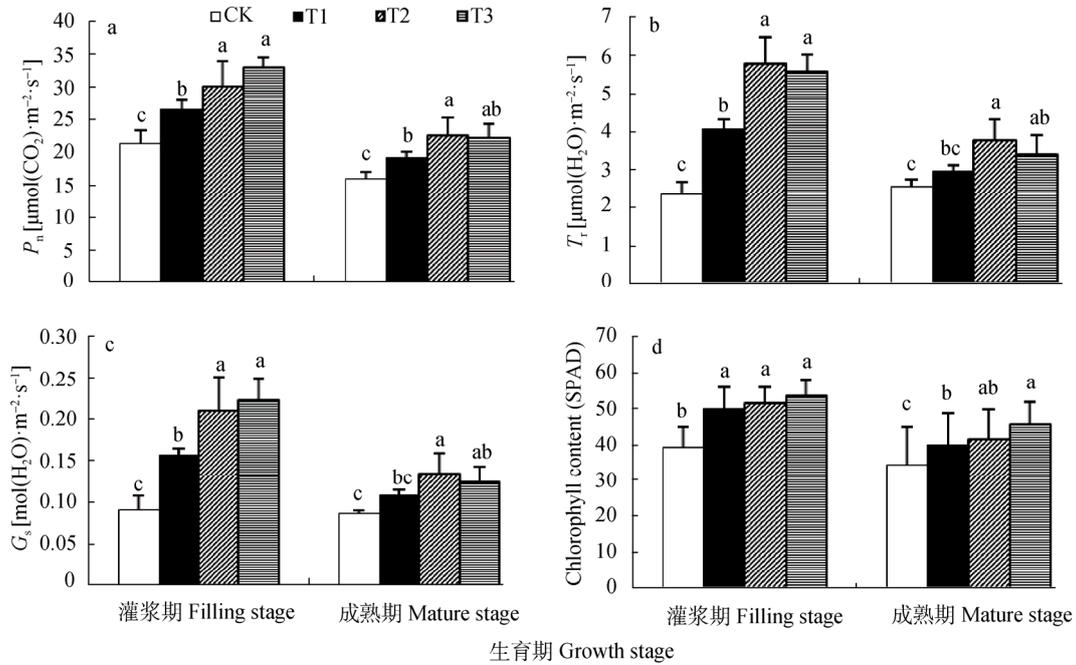


图 6 稻草覆盖对夏玉米光合速率(a)、蒸腾速率(b)、气孔导度(c)和叶绿素含量(d)的影响
Fig. 6 Effect of rice straw mulching on P_n (a), T_r (b), G_s (c) and chlorophyll content (d) of summer maize

2.3 试验期间季节性干旱发生情况

相对湿度指数是表征某时段降水量与蒸发量之间平衡的指标之一，此等级标准反映作物生长季节的水分平衡特征，适用于作物生长季节旬以上尺度的干旱程度监测与评估^[20-21]。

由图 7 可以看出整个生育期总降水量均大于总蒸发量，只有 2011 年总蒸发量与总降雨量相当，其次是 2009 年；干旱程度 2011 年>2009 年，剩余年份无法准确判断干旱程度，进一步判断需采用其他更细化指标。由表 3 和表 4 可知，蒸发降雨比表现为 2011 年>2009 年>2006 年>2007 年>2010 年>2008 年>2012 年，蒸发降雨比从整个生育期尺度进行表示，干旱次数表现为 2011 年>2009 年>2012 年>2007 年=2010 年>2008 年=2006 年，干旱程度表现为 2011 年>2009 年>2012 年>2010 年>2007 年>2008 年>2006 年，干旱次数和干旱程度均是通过相对湿度指数

旬尺度转化而来。其中 3 个指标对 2011 年>2009 年判断一致，2006 年在蒸发降雨比表示的干旱程度仅次于 2009 年，而在干旱次数和干旱程度的 2 个指标中均表现为最湿润的年份。

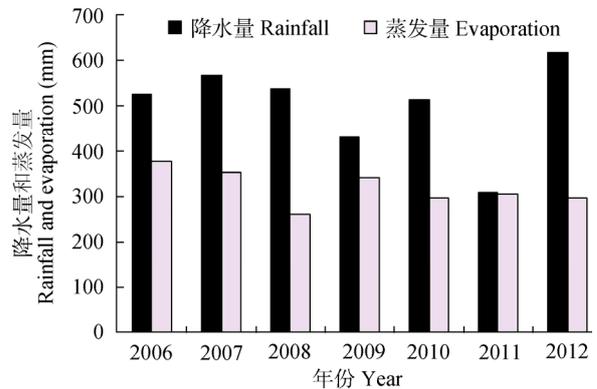


图 7 不同年份夏玉米生育期总降水量和总蒸发量
Fig. 7 Rainfall and evaporation in summer maize growth period in different years

表 3 不同年份夏玉米生育期相对湿度指数

Table 3 Relative moisture index of summer maize growth period in different years

旬 Ten days	年份 Year						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
6月上旬 Early Jun.	6.98	0.57	0.12	3.07	4.20	4.54	13.38
6月中旬 Mid-Jun.	0.48	-0.72	0.56	-0.72	2.70	7.67	-0.79
6月下旬 Late Jun.	0.63	0.30	0.98	3.52	-0.61	-0.68	2.77
7月上旬 Early Jul.	2.76	-0.50	0.99	0.09	0.23	-0.85	-0.72
7月中旬 Mid-Jul.	-0.21	3.35	0.89	-1.00	9.55	-1.00	14.20
7月下旬 Late Jul.	-0.37	2.15	-0.67	3.53	-0.66	-0.90	-0.48
8月上旬 Early Aug.	0.65	-0.17	0.30	-0.99	0.08	3.15	-0.22
8月中旬 Mid-Aug.	0.38	-0.38	5.03	-1.00	-0.16	-1.00	-0.79
8月下旬 Late Aug.	-0.35	2.49	5.07	-0.84	0.41	-0.30	0.58
9月上旬 Early Sep.	-0.66	2.90	1.03	-0.99	-0.37	-0.62	0.71
9月中旬 Mid-Sep.	-0.91	-0.65	-1.00	2.90	-0.99	-0.73	0.14

表 4 不同年份夏玉米生育期干旱指标
Table 4 Drought indexes of summer maize growth period in different years

干旱指标 Drought index	年份 Year						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
蒸发降雨比 Evaporation-precipitation ratio	0.71	0.63	0.49	0.79	0.58	1.00	0.48
干旱次数 Drought frequency	2	3	2	6	3	7	4
旬干旱发生比率 Drought occurrence rate per ten days (%)	18.2	27.3	18.2	54.5	27.3	63.6	36.4
干旱累积程度 Drought accumulation degree	0.76	1.15	0.87	3.15	1.06	2.99	1.18
干旱程度 Drought degree	2.76	3.67	2.87	9.15	4.06	9.99	5.18

2.4 玉米产量与干旱程度的相关分析

2006 年和 2008 年旬干旱发生比率为 18.2%, 2011 年旬干旱发生比率为 63.6%; 2006 年、2008 年、2011 年夏玉米产量在 3 个覆盖处理与对照之间没有显著差异; 其中 2006 年、2008 年干旱程度较低, 而 2011 年干旱程度极大造成产量极低, 不同处理间没有显著差异; 2007 年和 2012 年旬干旱发生比率为 36.4%, 2009 年旬干旱发生比率为 54.5%; 2007 年、2009 年和 2012 年玉米产量在 3 个覆盖处理与对照之间存在显著差异, 2012 年覆盖处理之间没有显著差异; 2007 年产量表现为 T1>T2>T3>CK, T1 与 T3 之间差异显著; 2009 年表现为 T3>T2>T1>CK, T3 与 T1 之间差异显著。2007 年 T1、T2 和 T3 比 CK 产量分别增加 31.8%、24.17%和 19.06%, 2009 年 T1、T2 和 T3 比 CK 产量分别增加 49.04%、58.83%和 68.63%, 2012 年 T1、T2 和 T3 比 CK 产量分别增加 84.15%、69.92%和 81.00%(图 8, 表 5)。

由图 8a 可知, 各处理产量(y)与蒸发降雨比(x)相关性均达到显著水平(P<0.05)。可见玉米生育期的蒸发降雨比可以作为表示干旱程度的一种指标。然而生育期间降雨量与蒸发量可以同步增加, 因此二者的比值代表玉米生育期干旱程度还需校正。

$y_{CK}=-21\ 015x^2+23\ 523x-2\ 481.2$, $R^2=0.877\ 9$, $sig=0.043$; $y_{T1}=-22\ 773x^2+23\ 223x-326.39$, $R^2=0.985\ 5$, $sig=0.002$; $y_{T2}=-23\ 501x^2+2\ 5251x-1\ 498.7$, $R^2=0.965\ 6$, $sig=0.006$; $y_{T3}=-2.260\ 3x^2+232.39x-419.11$, $R^2=0.957\ 3$, $sig=0.009$ 。

由图 8b 可知, 除 T3 外其余覆盖处理与玉米产量(y)均有显著水平(P<0.05)。然而旬干旱发生比率(x)只能表示玉米生育期旱了几次, 而不能表达玉米生育期的干旱时的实际干旱程度以及对下一阶段的影响。 $y_{CK}=-18\ 544x^2+7\ 249.5x+3\ 489.9$, $R^2=0.863\ 4$, $sig=0.049$; $y_{T1}=-58\ 172x^2+38\ 556x-378.53$, $R^2=0.928\ 2$, $sig=0.019$; $y_{T2}=-54\ 277x^2+36\ 437x-391.19$, $R^2=0.871\ 6$, $sig=0.046$; $y_{T3}=-55\ 194x^2+36\ 764x-208.14$, $R^2=0.828\ 7$, $sig=0.071$ 。

由图 8c 可知, 干旱次数和每次干旱的累积相加形成的干旱指标——干旱程度(x)与产量(y)的二次曲线拟合不显著。这个指标旨在反映玉米生育期的真实干旱程度, 然而干旱次数和每次干旱的累积程度简单相加并非能够准确反映真实的干旱程度, 因此还需要进一步改进。 $y_{CK}=-51.467x^2+213.77x+3\ 970.1$, $R^2=0.781\ 4$, $sig=0.102$; $y_{T1}=-242.86x^2+2\ 610.2x-737.36$, $R^2=0.848\ 7$, $sig=0.059$; $y_{T2}=-222x^2+2\ 410.4x-601.2$, $R^2=0.765\ 3$, $sig=0.114$; $y_{T3}=-230.72x^2+2\ 502.4x-615.44$, $R^2=0.731\ 9$, $sig=0.139$ 。

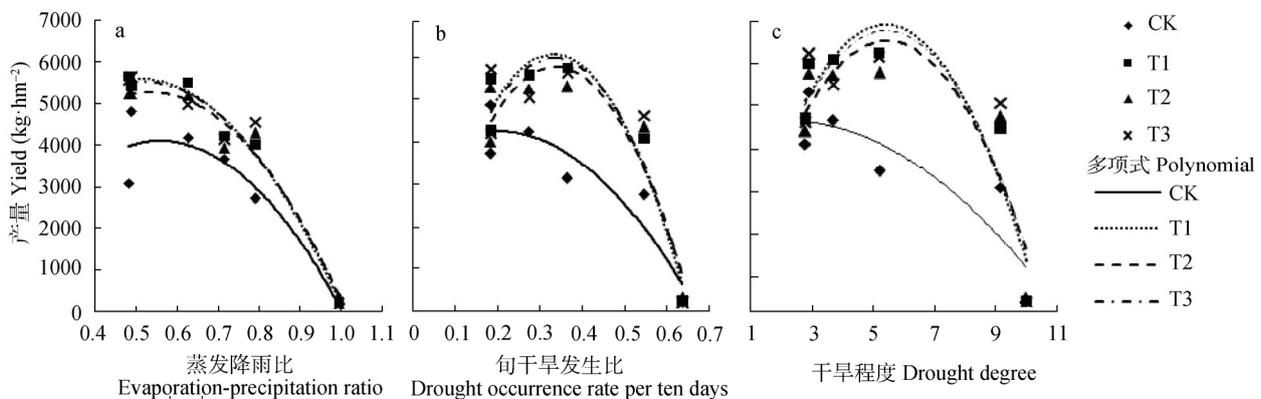


图 8 夏玉米产量与其生育期干旱指标的相关关系
Fig. 8 Correlations between summer maize yield and drought indexes in the whole maize grow period

表 5 稻草覆盖对夏玉米产量的影响
Table 5 Effect of rice straw mulching on maize yield

kg·hm⁻²

处理 Treatment	年份 Year					
	2006	2007	2008	2009	2011	2012
CK	3 678±640a	4 192±247c	4 826±1 340a	2 706±159c	185±33a	3 085±999b
T1	4 231±495a	5 525±116a	5 438±474a	4 033±243b	214±41a	5 681±959a
T2	3 957±407a	5 205±236ab	5 236±383a	4 298±159ab	282±56a	5 242±892a
T3	4 158±317a	4 991±199b	5 662±107a	4 563±92a	180±63a	5 584±454a

由于 2010 年苗期打除草剂影响试验正确性, 故未列出产量。Using of herbicides affected the test accuracy at seedling stage in 2010, so the data of 2010 is not listed in the table.

3 讨论与结论

红壤旱地的夏秋季节性干旱非常严重, 而稻草覆盖能够缓解其干旱程度。前人通过 2—3 年的短期效应得出秸秆适宜覆盖量^[12-15,22], 而红壤丘陵地区的干旱程度变异较大, 需要进行中长期效应研究。本研究通过 2006—2012 年夏玉米稻草覆盖试验得出, 稻草覆盖能够抑制土壤蒸发, 促使土壤温度变化平缓, 提高了土壤含水量, 这是稻草覆盖的当季效应(短期效应); 长期稻草覆盖还田能够提高红壤旱地土壤耕层有效水含量、难有效水含量和总有效水含量, 且随覆盖量的增加而增加, 从根本上缓解红壤旱地有效水库容较低的问题^[1]。作为反映稻草覆盖的抗旱性重要生理指标, 玉米的株高和光合速率、蒸腾速率、叶绿素以及气孔导度随覆盖量的增加而增加。蔡太义等^[14]认为一般丰水年秸秆覆盖对作物产量影响不显著, 干旱年对作物产量影响显著。刘超等^[23]研究结果显示, 秸秆覆盖量大于 9 000 kg·hm⁻²时无明显保墒效果。Balwinder 等^[7]指出稻草覆盖对作物产量的影响并非每年都有显著差异。本试验得出: 干旱程度与玉米产量呈二次曲线显著相关, 稻草覆盖对玉米产量的影响随着干旱程度的增加先升后降。稻草覆盖抗旱性只有在旬干旱发生比率为 18.2%~63.6%时才有效; 在 18.2%~36.4%时, 覆盖 5 000 kg·hm⁻²的玉米产量最大; 旬干旱发生比率在 36.4%~63.6%时, 玉米产量随覆盖量的增加而增加, 覆盖 15 000 kg·hm⁻²的玉米产量最大。综合而言, 根据本地区实际情况, 稻草覆盖量为 5 000 kg·hm⁻²较适宜。

相对湿润度指数虽然能指示出生育期每旬的干旱程度, 然而生育期旬与旬之间的干旱累积程度未能表达。干旱程度准确的表示和各生育时期的抗旱能力大小还需要进一步研究。

参考文献

[1] 王明珠. 我国南方季节性干旱研究[J]. 农村生态环境, 1997,

13(2): 7-11

Wang M Z. Study on seasonal drought in southern China[J]. Rural Eco-Environment, 1997, 13(2): 7-11

[2] 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, 114

Xie X L, Wang K R. Equilibrium and management of water resources in hilly area around Dongting Lake[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(4): 92-95, 114

[3] 朱捍华, 黄道友, 刘守龙, 等. 稻草易地还土对丘陵红壤有机质和主要物理性质的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2497-2502

Zhu H H, Huang D Y, Liu S L, et al. Effects of ex situ rice straw incorporation on organic matter content and main physical properties of hilly red soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(11): 2497-2502

[4] Balwinder-Singh, Humphreys E, Eberbach P L, et al. Growth, yield and water productivity of zero till wheat as affected by rice straw mulch and irrigation schedule[J]. Field Crops Research, 2011, 121(2): 209-225

[5] 王爱玲, 高旺盛, 洪春梅. 华北灌溉区秸秆焚烧与直接还田生态效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 142-144

Wang A L, Gao W S, Hong C M. Study on the ecological effect of crop residues burned or incorporated in field in North Central irrigated area of China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(1): 142-144

[6] 胡实, 谢小立, 王凯荣. 覆被对桔园旱季土壤水分变化和利用的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 976-983

Hu S, Xie X L, Wang K R. Effects of straw mulching and sodding culture on soil water use and variation in citrus orchard in dry season[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 976-983

[7] Balwinder-Singh, Eberbach P L, Humphreys E, et al. The effect of rice straw mulch on evapotranspiration, transpiration and soil evaporation of irrigated wheat in Punjab, India[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(12): 1847-1855

[8] Zhang Q T, Ma J, Li L, et al. Water vapour adsorption under rice-straw and gravel mulch in lysimeters[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2012, 10(1): 949

[9] 张俊鹏, 孙景生, 刘祖贵, 等. 不同水分条件和覆盖处理对夏玉米籽粒灌浆特性和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 501-506

Zhang J P, Sun J S, Liu Z G, et al. Effect of moisture and mulching on filling characteristics and yield of summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(3): 501-506

[10] 孙进, 徐阳春, 沈其荣, 等. 施用保水剂和稻草覆盖对作物

- 和土壤的效应[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 731-734
Sun J, Xu Y C, Shen Q R, et al. Effects of rice straw mulch and water-retaining agent on soil properties and crop yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(5): 731-734
- [11] 刘定辉, 陈尚洪, 舒丽, 等. 四川盆地丘陵区秸秆还田少免耕对土壤水分特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 119-122, 128
Liu D H, Chen S H, Shu L, et al. Impact of straw mulching and no-tillage on soil water characteristics of paddy field in hilly area of Sichuan basin[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(6): 119-122, 128
- [12] 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 X L, Wu P T, Wang Y K, 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
- [13] 刘超, 汪有科, 湛景武, 等. 秸秆覆盖量对夏玉米产量影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(4): 64-66
Liu C, Wang Y K, Zhan J W, et al. The influence of straw mulch amount to summer maize yield[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(4): 64-66
- [14] 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 T Y, Jia Z K, Meng L, et al. Effects of different rates of straw mulch on soil moisture and yield of spring maize in Weibei Highland area of China[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 43-48
- [15] 高飞, 贾志宽, 韩清芳, 等. 秸秆覆盖量对土壤水分利用及春玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 104-112
Gao F, Jia Z K, Han Q F, et al. Effects of straw mulching quantity on soil water use and spring maize yield[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(1): 104-112
- [16] 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(S1): 238-243
Cai T Y, Jia Z K, Huang Y W, 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(Sup. 1): 238-243
- [17] 彭建平, 邵爱军. 用 MatLab 确定土壤水分特征曲线参数[J]. 土壤, 2007, 39(3): 433-438
Peng J P, Shao A J. Determination of parameters of soil water characteristic curve by MatLab[J]. Soils, 2007, 39(3): 433-438
- [18] 魏义长, 刘作新, 康玲玲, 等. 土壤持水曲线 van Genuchten 模型求参的 Matlab 实现[J]. 土壤学报, 2004, 41(3): 380-386
Wei Y C, Liu Z X, Kang L L, et al. Parameters estimation of van Genuchten model for soil water retention curves using Matlab[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(3): 380-386
- [19] 白一茹, 邵明安. 黄土高原雨养区坡面土壤蓄水量时间稳定性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 45-50
Bai Y R, Shao M A. Temporal stability of soil water storage on slope in rain-fed region of Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 45-50
- [20] Zhang Q, Zou X K, Xiao F J, et al. Classification of meteorological drought[J]. China Standardization, 2011(5): 52-55
- [21] 冯建设, 王建源, 王新堂, 等. 相对湿度指数在农业干旱监测业务中的应用[J]. 应用气象学报, 2011, 22(6): 766-772
Feng J S, Wang J Y, Wang X T, et al. The application of relative humidity index to agricultural drought monitoring[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 22(6): 766-772
- [22] 苏衍涛, 王凯荣, 刘迎新, 等. 稻草覆盖对红壤旱地土壤温度和湿度的调控效应[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 670-676
Su Y T, Wang K R, Liu Y X, et al. Effects of rice straw mulching on soil temperature and moisture regulation in an upland red soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(2): 670-676
- [23] 刘超, 汪有科, 湛景武, 等. 秸秆覆盖量对农田土面蒸发的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(5): 448-451
Liu C, Wang Y K, Zhan J W, et al. The study of influence of straw mulch amount to soil moisture evaporation in farmland[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(5): 448-451

欢迎订阅《园艺学报》

《园艺学报》是中国园艺学会和中国农业科学院蔬菜花卉研究所主办的学术期刊, 创刊于 1962 年, 刊载有关果树、蔬菜、观赏植物、茶及药用植物等方面的学术论文、研究报告、专题文献综述、问题与讨论、新技术新品种以及园艺研究动态与信息, 适合园艺科研人员、大专院校师生及农业技术推广部门专业技术人员阅读参考。

《园艺学报》是中文核心期刊, 被英国《CAB 文摘数据库》、美国 CA 化学文摘、日本 CBST 科学技术文献速报、俄罗斯 AJ 文摘杂志、CSCD 中国科学引文数据库等多家数据库收录。《园艺学报》荣获第三届国家期刊奖及“中国精品科技期刊”、“中国权威学术期刊”、“新中国 60 年有影响力的期刊”、“中国国际影响力优秀学术期刊”等称号。

根据“中国学术期刊影响因子年报(2011 版)”, 《园艺学报》复合总被引频次为 11 630, 期刊综合总被引频次 5 317, 复合影响因子 1.780, 期刊综合影响因子 1.124。

《园艺学报》为月刊, 每月 25 日出版。每期定价 40 元, 全年 480 元。国内外公开发行, 全国各地邮局办理订阅, 国内邮发代号 82-471; 国外发行由中国国际图书贸易总公司承办, 代号 M448。漏订者可直接寄款至编辑部订购。

编辑部地址: 北京市海淀区中关村南大街 12 号中国农业科学院蔬菜花卉研究所《园艺学报》编辑部;

邮政编码: 100081; 电话: (010)82109523。E-mail: yuanyixuebao@126.com, 网址: <http://www.ahs.ac.cn>。