

不同留茬覆盖模式对土壤蒸发和表层土壤含水量的影响

李艳^{1,2}, 刘海军^{1*}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 秸秆覆盖模式可显著影响土壤蒸发量和土壤含水量。本研究根据小麦机械收获的特点, 设置不同的小麦留茬高度和覆盖量, 研究了不同留茬高度和覆盖量组合对冬小麦收获后土壤表层含水量和土壤蒸发量的影响。试验结果显示冬小麦留茬高度 0~35 cm 对表层土壤含水量和土壤蒸发影响较小, 而覆盖会明显改善土壤含水量和降低土壤蒸发量。当留茬高度为 0~15 cm、田间剩余秸秆覆盖量为 0.348~0.470 kg/m² 时, 试验期间 (31 d) 土壤累积蒸发量较无覆盖减少了 16%~51%。考虑机收特点, 建议小麦留茬高度为 5~15 cm, 其余残留碎秆覆盖在土壤表面, 以减少土壤蒸发和提高水分利用效率。

关键词: 留茬模式; 留茬+覆盖模式; 土壤含水量; 土壤蒸发

中图分类号: S318 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)03-0001-07

土壤蒸发是作物蒸散量的重要组成部分, 一般随着作物种类、气象条件和土壤措施等的不同而不同。研究发现作物(冬小麦、夏玉米和温室萝卜)生育期内, 土壤蒸发量在 100~200 mm 之间, 约占总蒸散量的 30%~50%^[1-4], 尤其在播种至地表被大部分覆盖期间, 作物蒸散量以土壤蒸发为主, 这期间土壤蒸发量可达蒸散量的 70%~100%^[3]。由于土壤蒸发属于无效耗水量, 因此减少土壤蒸发量对于提高水分利用效率, 尤其是在水资源缺乏地区具有重要意义。而留茬和秸秆覆盖可明显减少土壤蒸发量和作物耗水量。研究发现留茬和秸秆覆盖可提高 0~15 cm 土层含水量 2%~4%^[5], 减少土壤蒸发 30%~60%, 减少蒸散量 1%~11%, 提高水分利用效率 2%~30%^[6-10]。

大量研究显示随着覆盖量或覆盖厚度的增加土壤蒸发量逐渐降低。研究发现小麦秸秆覆盖量在 0.15~3.2 kg/m² 时, 土壤蒸发量减少 8%~78%^[6,8,11-12]。HoTaek 等^[13]从模型角度研究指出, 枯枝落叶覆盖层的蒸发阻力与覆盖层的厚度成正比, 当覆盖层厚度为 1.5 cm 和 2.0 cm 时, 土壤蒸发量分别减少 41% 和 54%。虽然增加秸秆覆盖量或秸秆厚度可降低土壤蒸发, 但是很多研究显示抑制土壤蒸发效果显著的秸秆覆盖量已经超过大田可能存在的秸秆残留量。如张俊鹏等^[9]推荐的最佳秸秆

覆盖量为 0.75 kg/m², 刘超等^[11]提出秸秆覆盖最佳厚度为 0.6~0.9 kg/m²; 而陈素英等^[14]得出机收小麦剩余秸秆加上拔出的根茬总量为 0.6 kg/m², 蒋斌等^[15]研究得出小麦地上部分秸秆理论产量最高为 0.476 kg/m²。因此应以实际收获时大田能够提供的秸秆量为基础, 研究此秸秆量条件下较优的覆盖模式, 以便于大面积推广使用。

目前在采用大型联合收割机进行冬小麦收获时地面有一定高度的留茬(立茬), 收获剩余的秸秆一般粉碎覆盖在土壤表面。李潮海等^[16]研究指出, 与立茬和除茬相比, 小麦收获后平茬(即秸秆覆盖)可显著增加表层土壤水分和降低土壤温度, 促进玉米生长; 赵霞等^[8]也提出平茬优于立茬和除茬, 更有利于保水高产。但以上研究都未提出在实际冬小麦收获条件下节水效果最好的留茬高度和碎秆覆盖量。本研究针对以上问题, 开展不同留茬高度和剩余碎秆覆盖条件下土壤蒸发的研究, 以期提出能够显著减少土壤蒸发量、且可大面积推广的小麦留茬高度和对应碎秆覆盖量。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2010 年 6~8 月冬小麦收获后在中国科学院地理科学与资源研究所通州农田水循环与节水

收稿日期: 2011-12-09

基金项目: 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(10501-260); 国家自然科学基金项目(51179005); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室基金(IWHR-SKL-201105)

作者简介: 李艳(1986—), 女, 四川绵阳人, 硕士研究生, 主要从事水资源高效利用的研究。

* 通讯作者: 刘海军(1975—), 男, 陕西富平人, 副教授, 主要从事农业水文过程及现代节水灌溉理论和技术的研究。E-mail: shanzhijh@yahoo.com.cn.

灌溉试验基地内进行(北纬 39°36', 东经 116°48', 海拔约 20 m)。收获时小麦植株平均高度为 65 cm, 其中秸秆高度为 58 cm, 去除籽粒后地上部分总生物量为 0.47 kg/m²。试验处理如表 1 所示。试验包括两种留茬覆盖模式, (1) 仅设置留茬模式(H 模式), (2) 留茬和覆盖相结合模式(H+M 模式)。留茬模式(H 模式)代表了小麦收获时籽粒和部分秸秆全部被移除农田的收获方式, 留茬+覆盖模式(H+M 模式)代表了采用现代联合收割机的收获方式, 该方式

收获后只带走小麦籽粒, 其他地上生物量全部留在田间。对于留茬模式, 设置 5 个留茬高度, 分别为 0.5、15、25 cm 和 35 cm。对于留茬+覆盖模式, 也设置 5 个留茬高度, 分别为 0.5、15、25 cm 和 35 cm, 对应的秸秆覆盖量分别为 0.47、0.30、0.348、0.267 kg/m² 和 0.187 kg/m²。留茬+覆盖模式下地表总残留生物量一样, 均为 0.47 kg/m²(表 1), 该值与陈素英等^[14]得出的 0.6 kg/m² 和蒋斌等^[15]得出的 0.476 kg/m² 小麦收获后田间总残留量一致。

表 1 试验处理

Table 1 Experiment design

模式 Mode	处理 Treatment	留茬高度(cm) Stubble height	留茬生物量(kg/m ²) Stubble biomass	覆盖生物量(kg/m ²) Mulching biomass	总生物量(kg/m ²) Total biomass above ground
留茬模式 (H 模式) Stubble mode	H5	35	0.283	0.0	0.283
	H4	25	0.203	0.0	0.203
	H3	15	0.122	0.0	0.122
	H2	5	0.040	0.0	0.040
	H1	0	0.000	0.0	0.000
留茬+覆盖模式 (H+M 模式) Stubble + straw mulching mode	H5M1	35	0.283	0.187	0.470
	H4M2	25	0.203	0.267	0.470
	H3M3	15	0.122	0.348	0.470
	H2M4	5	0.040	0.430	0.470
	H1M5	0	0.000	0.470	0.470

1.2 试验布置

2010 年 6 月中旬小麦收获前于大田取 30 cm 深的原状土(包括地上小麦部分, 此时小麦已成熟, 秸秆开始枯萎)分别放置在准备好的塑料桶中, 填装的土壤表面与桶上表面基本持平。塑料桶上表面和底部的直径分别为 31 cm 和 24 cm, 高 31.5 cm。试验包括 10 个处理, 每个处理重复 3 次, 即设置 3 个桶, 这样共包括 30 个试验桶。根据大田测量的冬小麦群体密度, 结合试验桶土壤上表面面积(754 cm²), 确定每个桶中的小麦茎秆总数(47 株)。然后根据试验处理(表 1), 分别对桶内的小麦茎秆进行相应处理。具体操作过程为, 对于 H 模式, 分别剪掉地上茎秆的多余部分, 使得留茬高度分别为 0.5、15、25 cm 和 35 cm。对于 H+M 模式, 则根据留茬高度, 先剪掉地上茎秆多余部分, 然后将这些多余的茎秆部分剪成 4~5 cm 的小节, 均匀地撒在试验桶内土壤上面, 以保证该模式下每个桶内的地上残留生物量相同。

在试验田间准备 2 m×6 m 的试验小区, 移除小区内 0~50 cm 深度内的土壤形成土坑, 在坑底部铺砖(约 20 cm 深)便于试验, 同时在坑上部安装 1.0 m

高的支架, 便于在降雨时用塑料布将试验小区覆盖, 使得降雨不能进入到小区内的试验桶中, 试验布置见图 1。于 2010 年 7 月初向每个桶中灌水, 直至桶中的土壤水达到饱和, 然后在桶底部用电烙铁开一直径约 5 mm 的圆孔, 便于排除土壤中多余的水分, 使得试验开始时土壤初始水分约等于田间持水量。桶内重力水排完后(约 24 h)将小孔堵上, 以消除小孔蒸发对土壤含水量和蒸发量的影响。

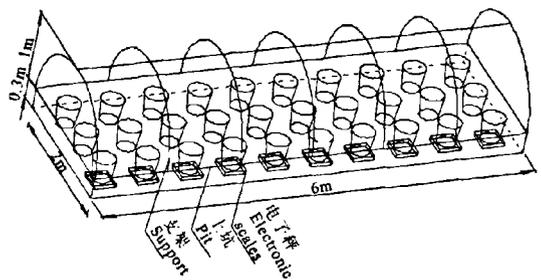


图 1 试验布置图

Fig. 1 Layout of experiment

1.3 试验观测

试验观测于 2010-07-16~2010-08-26 之间进行, 观测项目包括桶中土壤蒸发量、土壤表层含水

量,以及气象资料等。

土壤蒸发量用自动式称重系统来测量。该称重系统布置在试验桶的下面,每种处理布置1个,共有10套称重系统(Model NA1, Hope Tech. Co., Ltd, China)。所有称重系统均连接到CR3000采集器上(CR3000, Campbell Scientific, INC., USA),每分钟采集1次,记录10 min的平均值。

土壤含水量用取土烘干法测量,取样在未布置称重系统的另外两个桶内进行。文献^[17-19]显示表层0~2 cm深度的土壤含水量与土壤蒸发量关系紧密,并常用来模拟计算土壤蒸发量。因此为了减少取样对桶内土壤的破坏,试验中仅取表层0~2 cm土壤用于确定土壤含水量。每次取土后立即用相同含水量的土壤填充取土位置。填充土样从大田中挖取,通过目测土样颜色和手感土样温湿度的方法选择填充土样的湿润程度与桶内取样的土壤含水量相似。桶内0~2 cm土壤含水量根据土壤蒸发强度每隔2~5 d测定1次,取样时间一般在7:30左右。

气象资料包括2 m高处的温度、相对湿度、风速等,用自动气象站测量。水面蒸发量用直径为20 cm的标准蒸发皿测量,测量时间为每天8:00左右。

借助 Excel 和 SPSS 软件对试验数据进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 土壤含水量

图2描述了试验期间不同处理0~2 cm土壤含水量变化过程。从图中可以看出,两种模式下表层土壤含水量变化过程不同。图2(a)显示,H模式下,随着蒸发日期的增加表层土壤含水量在蒸发前期呈现出迅速下降的趋势,试验开始20 d后,表层土壤含水量下降到0.05 g/g以下,变化趋于稳定。比较H模式下不同留茬高度的土壤含水量可知,留茬高度对土壤表层含水量的影响较小。图2(b)显示,H+M模式条件下,试验期间内表层土壤含水量基本呈现线性下降的趋势。H5M1处理由于秸秆覆盖量最小,其表层土壤含水量变化趋势与H模式下的变化趋势相似。表层土壤含水量一般随着覆盖量的增加而增加。H5M1处理的覆盖量最小,其表层土壤含水量也最小,H1M5处理的覆盖量最大,其表层土壤含水量也最高。在H+M模式条件下,5种处理的地表总生物残留量相同,考虑到留茬对表层土壤含水量影响较小(图2(a)),那么可以得出减少留茬高度,增加覆盖量,有利于提高表层土壤含水量。

通过对比图2中相同留茬高度下两种模式(如H1和H1M5),可以看出,同一留茬高度条件下(H相同),有覆盖(H+M模式)可显著提高表层土壤含水量,增加的表层土壤含水量一般随着覆盖量的增加而增加。H5M1处理的覆盖量最小,因此覆盖对表层土壤含水量的增加值影响最小,试验开始20 d以后,有、无覆盖表层土壤含水量基本相同。而当覆盖量增加到0.267~0.47 kg/m²时,试验期间覆盖条件下的表层土壤含水量一直要高于没有覆盖条件下的。试验开始后10~30 d内,在留茬高度分别为35、25、15、5 cm和0 cm时,覆盖条件下表层土壤含水量分别提高了0.045、0.100、0.121、0.082 g/g和0.150 g/g。图2的结果可以得出,减少留茬高度,增加覆盖量有利于提高土壤表层含水量,这将会为下季作物提供较好的土壤水分环境,利于作物的出苗和苗期生长。

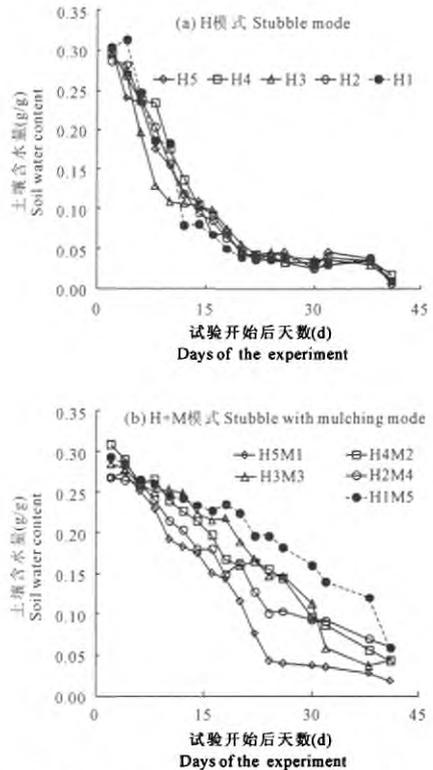


图2 试验期间不同处理表层0~2 cm土壤含水量变化过程

Fig.2 Soil water content in 0~2 cm soil layer in the experimental period

2.2 土壤蒸发量

图3描述了试验期间不同留茬和覆盖处理条件下日土壤蒸发量的变化过程。从图3(a)可以看出,除留茬高度为0 cm处理的土壤蒸发量在前10 d明

显大于其它留茬高度处理外,其它留茬高度的土壤蒸发量相近,这表明增加留茬高度对土壤蒸发量没有明显影响,该结果和留茬高度与土壤表层含水量显示的规律相似(图2(a))。图3(b)显示,在地表残留总生物量一样的条件下,不同覆盖量会对土壤蒸发产生显著影响($P < 0.01$),一般表现为覆盖量越多,土壤蒸发量越小。覆盖量最大的H1M5处理的土壤蒸发量最小且日间变化也较小,一般在1 mm/d左右;而覆盖量最小、留茬高度最大的H5M1处理土壤蒸发量最大且日间变化较大,日蒸发量一般在1~3 mm/d之间。张俊鹏等^[9]研究发现,秸秆覆盖有抑制地温增加和稳定地温的作用,且这种效果随着覆盖量的增加而增加。这样在地温比较稳定,土壤含水量较高情况下,土壤的蒸发量也将比较稳定,如覆盖量最大的H1M5处理。而H5M1处理由于没有覆盖,因此对平抑地温的效果较差,同时土壤含水量变化比较剧烈(图2),因此土壤蒸发量变化也较大。

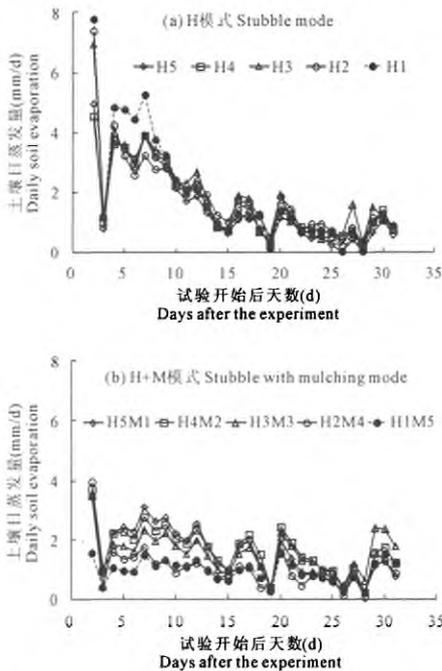


图3 试验期间不同处理土壤日蒸发量变化过程
Fig.3 Daily soil evaporation in the experimental period

为了研究H+M模式下不同覆盖量时土壤蒸发量减少过程,计算了试验期间同一留茬高度时未覆盖与覆盖条件下土壤蒸发量的差值,如图4所示。从图中可以看出,覆盖在前期(前10 d)对土壤蒸发的影响较大,随后影响较小,这可能是由于后期土壤含水量较低所致。试验进行10~13 d以后,H5M1、

H4M2和H3M3处理的蒸发量要高于相同留茬高度处理,这可能是由于覆盖处理的土壤含水量要显著高于没有覆盖条件下的土壤含水量(图2),土壤供水量充足,进而在同样气象条件下蒸发量大。在试验的前10 d,覆盖对土壤蒸发的影响最大,这可能是由于该阶段土壤含水量较高(图2),限制土壤蒸发的主要因子为近地面的微气象条件。H1处理由于没有留茬,为裸地,因此蒸发量最大,而H1M5处理覆盖量最大,这时较大的覆盖量限制了土壤表面和自由大气中水分的交换,增加了水分传输的阻力,因而蒸发量小。在前10 d,增加覆盖可减少土壤蒸发量6~27 mm。

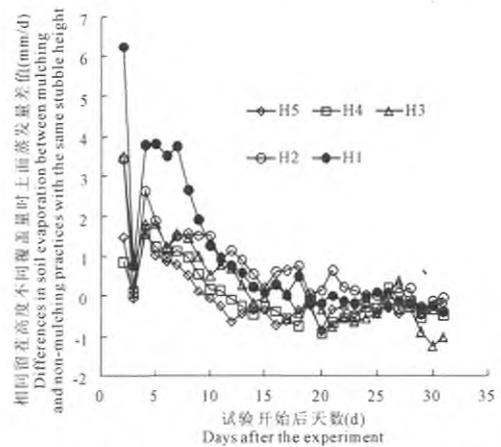


图4 同一留茬高度条件下不覆盖与覆盖土壤蒸发量差在试验期变化过程

Fig.4 Differences in soil evaporation between mulching and non-mulching conditions with the same stubble height in the experimental period

在试验进行的前31 d,留茬处理H1、H2、H3、H4和H5的累积土壤蒸发量分别为57.6、54.2、54.9、49.7 mm和44.7 mm,可以看出随着留茬高度的增加土壤蒸发量有一定的减少,但是减少量较小,一般<10%(图5)。留茬+覆盖模式数据显示,处理H1M5、H2M4、H3M3、H4M2和H5M1的累积土壤蒸发量分别为28.4、32.1、46.1、49.7 mm和46.5 mm,表明在总残留生物量相同的条件下降低留茬高度、增加覆盖量可显著降低土壤蒸发量。与仅留茬相比,增加覆盖可显著降低土壤蒸发量0~50%。张俊鹏等^[9]研究得到,在秸秆覆盖量为0.15~0.45 kg/m²时,蒸发量与裸地相比减少了34%~53%。在不考虑留茬高度影响土壤蒸发的条件下,回归分析了覆盖量(M , kg/m²)与土壤蒸发减少百分比(E_{reduce} , %)的关系,回归关系为:

$$E_{\text{reduce}} = 1.45M^2 + 6.31M - 14.18 \quad (1)$$

$$(R^2 = 0.97)$$

图5显示:H3M3、H2M4和H1M5处理的土壤蒸发量分别较无覆盖条件下减少了16%~51%,但是考虑到H1M5处理的留茬高度为0,在收割机收获时不现实,因此建议收获时的留茬高度为5~15cm,这时秸秆覆盖量为0.35~0.43 kg/m²,该覆盖量与孟毅等^[20]提出0.412 kg/m²接近。

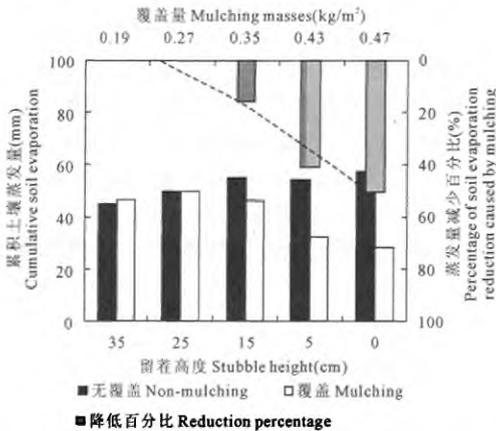


图5 试验期间不同处理土壤累计蒸发量,以及留茬+覆盖模式下土壤蒸发量减少百分比与覆盖量的关系

Fig.5 Cumulative soil evaporation of each treatment in the experimental period, and the relationship between mulching mass and the reduction of soil evaporation in different mulching modes as compared to non mulching with the same stubble height

2.3 土壤相对蒸发量与土壤表层含水量的关系

气象条件、土壤含水量和土壤表层覆盖是影响土壤蒸发(E)的主要要素^[21-23]。水面蒸发量(E_{pan})可综合反映当地的气象条件。为了去除气象因素对土壤蒸发的影响,采用土壤相对蒸发量 E/E_{pan} 进行分析。本试验中 E_{pan} 用直径为20cm的标准蒸发皿测量得到。图6描述了H模式和H+M模式时土壤相对蒸发量(分别为同一模式5个处理的平均值)在试验期间的变化过程。可以看出随着试验时间的增加,相对蒸发量逐渐减低,其趋势可用二次多项式回归得到。本试验两种模式条件下相对蒸发量(E/E_{pan})与试验开始后的天数(D)的回归公式分别为:

H模式:

$$E/E_{pan} = 0.0015D^2 - 0.0767D + 1.1031 \quad (2)$$

$$(R^2 = 0.874, F < 0.01)$$

H+M模式:

$$E/E_{pan} = 0.0004D^2 - 0.0212D + 0.5059 \quad (3)$$

$$(R^2 = 0.439, F < 0.01)$$

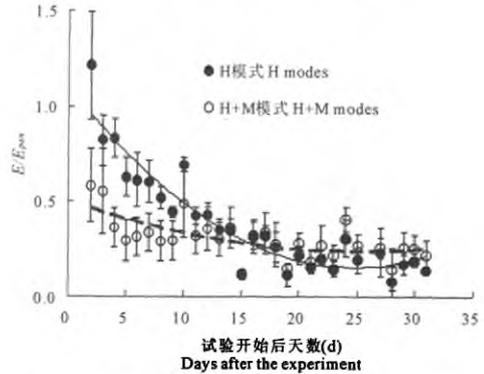


图6 试验期间H模式和H+M模式下土壤相对蒸发量(E/E_{pan})的变化过程

Fig.6 Relative soil evaporation (E/E_{pan}) under stubble modes (H mode) and stubble with mulching modes (H+M mode) in the experimental period

分析了H模式和H+M模式下土壤相对蒸发量与土壤表层0~2cm含水量的关系,发现不同模式条件下相对蒸发量与含水量的关系不同。因此在进一步分析过程中将两种模式条件下土壤相对蒸发量与含水量的关系分别进行分析。

分析显示留茬高度对土壤相对蒸发量影响较小,因此将留茬模式下5个处理的土壤含水量和蒸发量取平均值,分析在H模式下土壤含水量对蒸发量的影响,如图7所示。从图中可以看出,依据土壤含水量,将土壤相对蒸发量与含水量的关系分为两部分:当土壤含水量小于0.15 g/g时,相对蒸发量(E/E_{pan})一般随着含水量(SW , g/g)的降低而线性减少,两者的回归关系为:

$$E/E_{pan} = 2.38SW + 0.14 \quad (4)$$

$$(n = 41, R^2 = 0.51, F < 0.01)$$

而当土壤含水量大于0.15 g/g时,相对蒸发量虽随含水量的增加有一定的上升趋势,但是统计分析显示,这种变化趋势并不显著($F > 0.05$),表明蒸发量受土壤含水量的影响较小。因此可以认为在该阶段,土壤相对蒸发量不随土壤含水量的变化而变化,可用一个平均值代替。数据计算得到,该阶段相对蒸发量(E/E_{pan})为0.641($n = 18$)。这表明在土壤含水量大于0.15 g/g时,土壤蒸发量为0.641 E_{pan} 。

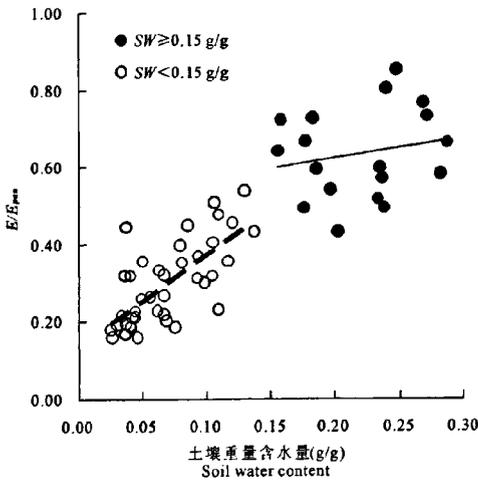


图7 H模式下土壤相对蒸发量(E/E_{pan})与表层0~2 cm土壤含水量的关系

Fig.7 Relationship between relative soil evaporation(E/E_{pan}) and soil water content(SW) in 0~2 cm soil layer under stubble mode
在H+M模式时,不同覆盖量条件下土壤相对

表2 H+M模式下土壤相对蒸发量(E/E_{pan})与表层0~2 cm土壤含水量的关系

Table 2 Relationship between relative soil evaporation(E/E_{pan}) and soil water content of the 0~2 cm layer under H+M mode

模式 Mode	处理 Treatment	回归公式 Regressed equations
留茬+覆盖模式 (H+M模式) Stubble + straw mulching mode	H5M1	$E/E_{pan} = 1.455SW + 0.17$ ($R^2 = 0.577, F < 0.01$)
	H4M2	$E/E_{pan} = 1.137SW + 0.201$ ($R^2 = 0.378, F < 0.01$)
	H3M3	$E/E_{pan} = 0.336SW + 0.308$ ($R^2 = 0.071$)
	H2M4	$E/E_{pan} = 0.092SW + 0.225$ ($R^2 = 0.004$)
	H1M5	$E/E_{pan} = -0.204SW + 0.291$ ($R^2 = 0.019$)

注:SW为0~2 cm土壤质量含水量(g/g)。

Note: SW is the soil mass water content in 0~2 cm(g/g).

3 结论

1) 留茬高度0~35 cm对土壤表层0~2 cm含水量影响较小,但是覆盖会显著影响表层土壤含水量,且覆盖量大的土壤含水量要高于覆盖量小的土壤含水量。

2) 留茬高度0~35 cm对土壤蒸发量影响较小,但是覆盖会显著影响土壤蒸发量,且随着覆盖量的增加土壤蒸发量逐渐降低。

3) 土壤蒸发量与表层0~2 cm土壤含水量密切相关,当含水量小于0.15 g/g时,相对蒸发量(土壤蒸发量与20 cm蒸发皿蒸发量比值)随含水量的降低而线性减小,但是当含水量高于0.15 g/g时,相对蒸发量基本保持稳定,为水面蒸发量的0.641倍。

4) 在田间残留总生物量一样的条件下减少留

茬量与表层0~2 cm土壤含水量的关系不同,因此对于5个覆盖量分别进行分析,结果见表2。当覆盖量为M1和M2处理时,相对蒸发量随着含水量的增加而显著线性增加,但是回归线性方程的斜率显示M1覆盖的斜率要大于M2覆盖的斜率,表明M1覆盖条件下,土壤蒸发量受土壤含水量的影响要大于M2覆盖条件下的影响。当土壤覆盖量从M3增加到M5时,相对蒸发量与土壤含水量关系较小,表明这时含水量对相对蒸发的影响较小。进一步分析发现,对于M3~M5覆盖量处理,试验期间表层土壤含水量一般要大于0.15 g/g,参考图7的结论,可以得出土壤含水量高可能是造成相对蒸发量与土壤含水量相关性较小的主要原因。若不考虑土壤含水量对相对蒸发量的影响,则得到M3、M4和M5覆盖处理时,试验期间相对蒸发量分别为0.331、0.212和0.208。这些相对蒸发量值要显著低于无覆盖条件下的相对蒸发量值0.641(图7),表明在覆盖量为0.348~0.470 kg/m²时,若土壤水分充足,土壤相对蒸发量可减少50%~70%。

茬高度、增加覆盖量有利于改善土壤含水量和降低土壤蒸发量。建议小麦收获后留茬高度为5~15 cm,其它残余碎秆覆盖在土壤上面,以减少土壤蒸发量和提高土壤水分利用效率。

参考文献:

- [1] Liu C, Zhang X, Zhang Y. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111: 109-120.
- [2] 刘浩,孙景生,段爱旺,等.日光温室萝卜棵间土壤蒸发规律试验[J].农业工程学报,2009,25(1):176-180.
- [3] 王健,蔡焕杰,康燕霞,等.夏玉米棵间土面蒸发与蒸发蒸腾比例研究[J].农业工程学报,2007,23(4):17-24.
- [4] Xiyang Z, Dong P, Chunsheng H. Conserving groundwater for irrigation in the North China Plain[J]. Irrigation Science, 2003, 21: 159-166.

- [5] Patra D D, Muni Ram, Singh D V. Influence of straw mulching on fertilizer nitrogen use efficiency, moisture conservation and herb and essential oil yield in Japanese mint (*Mentha arvensis* L.) [J]. *Fertilizer Research*, 1993, 34:135-139.
- [6] 陈素英, 张喜英, 裴冬, 等. 玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(10):171-173.
- [7] 王慧杰, 冯瑞云, 张志军, 等. 不同有机覆盖物对土壤水分蒸发的影响[J]. *山西农业科学*, 2009, 37(6):42-44.
- [8] 赵霞, 王秀萍, 刘天学, 等. 麦茬处理方式对土壤蒸发及夏玉米水分利用效率的影响[J]. *耕作与栽培*, 2008, (4):9-32.
- [9] 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.
- [10] Rita D, Joschim I, Thilo S. The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: Experimental findings and modeling [J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 96:52-63.
- [11] 刘超, 汪有科, 湛景武, 等. 秸秆覆盖量对农田上面蒸发的影响[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(5):448-451.
- [12] 脱云飞, 费良军, 杨路华, 等. 秸秆覆盖对夏玉米农田土壤水分与热量影响的模拟研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(6):27-32.
- [13] HoTaek P, Shigeaki H, Takafumi T. Development of a numerical model for evaluating the effect of litter layer on evaporation [J]. *Journal of Forest Research*, 1998, 3:25-33.
- [14] 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.
- [15] 蒋斌. 楚州区小麦秸秆资源调查与分析[J]. *安徽农业通报*, 2010, 16(11):201-202.
- [16] 李潮海, 赵霞, 刘天学, 等. 麦茬处理方式对机播夏玉米的生态生理效应[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(1):162-166.
- [17] Bittelli M, Ventura F, Campbell G S, et al. Coupling of heat, water vapor, and liquid water fluxes to compute evaporation in bare soils [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 362:191-205.
- [18] Aydin M, Yang S L, Kurt N, et al. Test of a simple model for estimating evaporation from bare soils in different environments [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 182:91-105.
- [19] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. *土壤水动力学* [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [20] 孟毅, 蔡焕杰, 王健, 等. 秸秆覆盖对夏玉米的生长及水分利用效率的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(6):131-135.
- [21] 刘立晶, 高焕文, 李洪文, 等. 保护性耕作条件下影响蒸发量因素的试验研究[J]. *中国农业大学学报*, 2006, 11(4):78-82.
- [22] 胡实, 谢小立, 王凯荣. 秸秆覆盖对玉米田棵间蒸发和近地层气象要素的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 29(2):170-173.
- [23] 于稀水, 廖允成, 袁泉, 等. 秸秆覆盖条件下冬小麦棵间蒸发规律研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(3):54-57.

Effects of stubble and mulching modes on soil evaporation and soil water content

LI Yan^{1,2}, LIU Hai-jun^{1*}

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. College of Water Conservancy & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083)

Abstract: Straw mulching has important effects on soil evaporation and soil water content. Different stubble height and mulching quantity was set to study the effects of these practices on soil water content and soil evaporation after winter wheat harvest. The results showed that remaining stubble height of 0 ~ 35 cm had minor effects on soil water content and soil evaporation. However, mulching practices caused a significant reduction of soil evaporation. During the experimental period (31 d), the total amount of soil evaporation reduced by 16% ~ 51% under mulching quantity of 0.348 ~ 0.470 kg/m² as compared to no mulching when stubble height was 0 ~ 15 cm. In consideration of the feasibility of machine harvest for wheat, the recommended mode is leaving stubble height of 5 ~ 15 cm and mulching remaining straw on soil surface, so as to reduce soil evaporation and increase soil water use efficiency.

Keywords: stubble mode; stubble with mulching mode; soil water content; soil evaporation