排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2015 年 12 月 Dec. 2015 | 第 33 卷 第 12 期 Vol. 33 No. 12

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.15.0089

秸秆覆盖夏玉米田棵间蒸发变化规律

赵秀金[1]，张志涛[2]，张照录[3]，马艳飞[3]，吴忠东[3]
（1.山东理工大学农业与食品科学学院，山东 淄博 255049；2.山东颐通土地房地产评估测绘有限公司，山东 济南 250100；3.山东理工大学资源与环境工程学院，山东 淄博 255049）


赵秀金

摘要：为了提高华北地区降雨的利用效率，采用覆盖免耕农艺措施，利用微型蒸发器并结合土壤含水率估算农田蒸散量 *ET*，对秸秆覆盖夏玉米田棵间蒸发及棵间蒸发量占蒸散量的比值 *E/ET* 变化规律进行了研究. 结果表明：全生育期玉米的棵间蒸发量覆盖处理比对照处理平均减少 39.5%，差异具有统计学意义；棵间累积蒸发量与时间的关系变化趋势符合幂函数型，其拟合相关系数均达到 0.99；覆盖处理 *E/ET* 为 33.5% 左右，对照处理 *E/ET* 为 41% 左右；秸秆覆盖与不覆盖处理的 *E/ET* 与叶面积指数的相关系数分别达到 0.70 和 0.85 左右. 华北地区降雨总量基本与覆盖处理耗水量持平，但对照则出现阶段性缺水. 该研究体现了覆盖免耕保墒技术的优势，为其在节水农业方面提供理论依据.

关键词：夏玉米；秸秆覆盖；棵间蒸发；土壤含水率；叶面积指数
中图分类号：S274.1　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2015)12-1085-06

赵秀金，张志涛，张照录. 秸秆覆盖夏玉米田棵间蒸发变化规律[J]. 排灌机械工程学报，2015，33(12)：1085-1090.

ZHAO Xiujin，ZHANG Zhitao，ZHANG Zhaolu，et al. Soil evaporation for summer maize under no-tillage with straw mulching [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2015，33(12)：1085-1090.(in Chinese)

Soil evaporation for summer maize under no-tillage with straw mulching

ZHAO Xiujin[1]，*ZHANG Zhitao*[2]，*ZHANG Zhaolu*[3]，*MA Yanfei*[3]，*WU Zhongdong*[3]
(1. Institute of Agricultural Engineering and Food Science，Shandong University of Technology，Zibo，Shandong 255049，China；2. Shandong Yitong Real Estate Appraisal and Mapping Co. Ltd.，Jinan，Shandong 250100，China；3. Institute of Resources and Environment Engineering，Shandong University of Technology，Zibo，Shandong 255049，China)

Abstract：To improve the utilization efficiency of rainfall in North China，micro-lysimeters (MLS) were selected to measure soil evaporation(*E*) of summer maize with and without straw mulching and combined with soil moisture to estimate evapotranspiration(*ET*). The seasonal dynamics of *E* over the field and the ratio of *E* to *ET* were studied. The results show that soil evaporation of summer maize with straw mulching was reduced by an average of 39.5% compared with CK，and there was significant difference. The change trend of accumulative evaporation capacity and time is in line with the power function model，and the fitting correlation coefficient reached to 0.99. Straw mulched and no mulch treatment *E/ET* were about 33.5% and 41%. The correlation coefficients of evapotranspiration of straw mulched and no mulch treatments under the condition of evaporation and leaf area index were 0.70 and 0.85，respectively. The total rainfall in North China and the coverage of basic water con-

收稿日期：2015-04-23；**网络出版时间**：2015-12-16
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20151216.1725.032.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(41271236，41402208)；山东省自然科学基金资助项目(ZR2012DL05)；山东省社会科学规划研究项目(13DJJJ15)
作者简介：赵秀金(1987—)，女，山东菏泽人，硕士研究生(1003944176@qq.com)，主要从事农业水土工程研究.
吴忠东(1968—)，女，山东淄博人，副教授，博士(通信作者，wuzhongdong@126.com)，主要从事农业水土工程研究.

sumption were about the same, but the control appeared stage water shortage. The study reflects the advantage of no-tillage with mulching agricultural water conservation technique, and offers a theoretical basis for water-saving agriculture.

Key words: summer maize; straw mulching; soil evaporation; soil moisture; leaf area index

水资源紧缺已经成为现代农业发展面临的重要限制因素之一,尤其在华北平原水资源短缺更为严峻,大部分河流长期干涸,地下水超采严重;同时华北平原又是中国粮食的主产区,农业用水占总用水量的一半以上[1],加之农田灌溉水有效利用系数仅为0.4[2],农业用水浪费严重,如何实现节水增产是众多研究者所关注的.华北地区属于温带大陆性季风型气候区,多年平均降雨量为547 mm,降水时空分布不均,同时降雨时期与作物需水期存在严重的不同步现象,为了更有效地利用降雨资源,探明该地区农作物的耗水规律,提高土壤的蓄水保墒能力就显得尤为重要.经过多年的探索,秸秆覆盖免耕这一农艺措施因其能促进自然降水就地入渗和存蓄,减少农田棵间蒸发,提高有限降水利用效率,实现节水增产目标,而存在较大的优势[3].

秸秆覆盖是在土壤表面形成一道减少土壤与大气间水热交换的物理阻隔层,阻碍土壤与大气层间的水分和能量交换,使得土壤的水、肥、气、热等状况得到重新组合,生态、社会和经济效益较高,是北方地区农业持续稳定发展的有效措施之一[4].农田棵间蒸发在农田水分利用中属于非生产性耗水,且在总用水中占很大比例,研究其变化规律及其在总蒸散量中所占比例是农田水分管理的关键.有关覆盖对夏玉米棵间蒸发规律影响的报道已较多,董智[5]指出稻秆覆盖降低土壤蒸发,提高土壤含水率;张海林等[6]指出覆盖免耕能有效地减少土壤棵间蒸发,增加玉米的蒸腾量,变非生产性耗水为有效耗水;雷金银等[7]研究指出覆盖免耕具有保水和调节水量供需的作用,能保证作物需水.赵娜娜等[8]利用大兴蒸渗仪、小型蒸发器和茎流计得到夏玉米生育期的总耗水量为436.3 mm,棵间蒸发占总腾发量的比例达27.5%.胡实等[9]指出夏玉米全生育期5 000 kg/hm^{2}覆盖和15 000 kg/hm^{2}覆盖分别比无覆盖处理的棵间蒸发低51.4 mm和75.4 mm.

许多学者对常规耕作模式下影响土面蒸发量的相关因子进行了研究,土壤表面蒸发量变化主要与土壤含水率、地面覆盖度、气温、风速等气象要素有关.文中在研究秸秆覆盖下夏玉米田棵间蒸发的变化规律基础上,试图探明秸秆覆盖抑制土面蒸发的机制,为秸秆覆盖免耕保墒技术在节水农业方面提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验田设在北京市大兴区中国水利水电科学研究院试验基地(116°15′E,39°39′N)进行,该地属典型的半干旱大陆性季风气候,站内设有气象站,多年平均降雨量540 mm.试验田0~100 cm土层深度的土壤质地为壤土,容重随土层深度[0,20),[20,40),[40,60),[60, 80]cm分别为1.36,1.65,1.63,1.67,1.61 g/cm^3.以夏玉米为研究对象,田间试验于2013年7—9月进行,冬小麦收割后,为保证夏玉米出苗,在种植夏玉米以前,每个试验小区灌水3 m^3,灌后2 d播种,夏玉米采用联科96品种,种植行距为60 cm,株距30 cm.

1.2 试验设计

试验以秸秆覆盖(mulched)为处理,覆盖量为6 000 kg/hm^2,另设置对照组无覆盖(CK),每个处理重复4次共8个小区,每个小区18.9 m×4.4 m.

1.3 观测项目

1.3.1 叶面积指数

在有微型蒸发器小区随机选择3株玉米并进行标记,每8 d测量1次,利用卷尺测其叶片的长和宽,叶面积指数结合种植密度求出,计算公式[10]为

$$LAI = 0.75\rho\sum_{i=1}^{n}(a_i \times b_i), \tag{1}$$

式中:ρ为种植密度;i为叶片数;n为叶片总数;a_i为测定的叶长;b_i为测定的叶宽.

1.3.2 土壤含水率

利用AZS-2H土壤墒情监测系统对土壤各层含水率进行连续不断记录,记录间隔为30 min,分别记录的是[0,20),[20,40),[40,60),[60, 80]cm.

1.3.3 棵间蒸发量

采用电子天平(精度0.1 g,换算成水深约为0.001 2 mm)和自制的微型蒸发器[11],其由内桶和外桶组成,高度15 cm,由PVC材料制成,外桶直径略大于内桶外径,高度与内桶相同.先将内桶打入

土壤钻取原状土，刮平低端，用尼龙纱网封底，外桶置于取土处固定，将内桶置于外桶. 覆盖及不覆盖处理均在各小区中间不同行设 15 cm 高桶 2 个，6 d 更换 1 次，降雨量超过 20 cm 全部更换. 每天下午 5 点和 6点称重，2 次称重结果之差即为蒸发水量损失，根据内桶截面积进行转换.

1.4　田间蒸散量确定

试验开展期间夏玉米田 ET 采用水量平衡原理[10]计算，公式为

$$ET = P + I - \Delta W - D - R, \tag{2}$$

式中：ET 为时段内蒸散量，mm；P 为时段内降雨量，mm；I 为时段内灌溉量，mm；ΔW 为时段开始和结束时的土壤含水率变化量，mm；D 为深层渗漏量，为地表径流损失，mm；R 为地表经流损失，mm.

研究期间降雨充沛，没有达到灌水下限，单次降雨量最大到 59 mm，因此地表未形成积水，可忽略.

深层渗漏量[12]计算公式为

$$D = \alpha I, \tag{3}$$

式中 α 取 0. 1.

文中的蒸散量计算公式为

$$ET = P - \Delta W - D.$$

由此土壤含水率的测定是利用水量平衡法确定 ET 的关键. 文中土壤含水率，按土层深度测定土壤含水率.

2　结果与分析

2.1　逐日棵间蒸发变化规律

利用微型蒸发器测得两处理的棵间蒸发量 ET 及试验年日有效降雨量 P 变化见图 1.

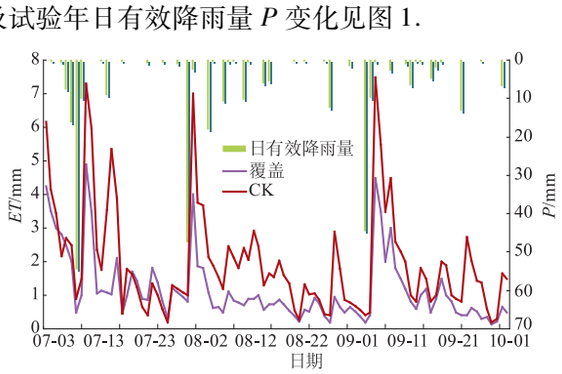


图 1　玉米全生育期棵间蒸发与降雨量变化

Fig. 1　Changes of evaporation and rainfall during maize growing period

由图 1 可以看出，2 个处理的棵间蒸发在整个生育期内的变化趋势基本相同；玉米生长初期两者棵间蒸发均较大，且从播种到苗期逐渐增大，不覆盖最大达到 7. 5 mm/d，覆盖最大达到 4. 9 mm/d. 初期的叶面积指数较小，地面裸露程度较大，覆盖减少了太阳对土面的辐射量，抑制蒸发效果较为明显.

玉米生育期中后阶段处于生殖生长和产量形成阶段，叶面积指数达到最大，作物蒸腾作用逐渐增强，蒸发量减小并保持在稳定变化范围内，覆盖处理在 1. 0 mm/d，不覆盖处理保持在 3. 0 mm/d，全生育期覆盖较不覆盖减少 39. 5% 棵间蒸发量. 单因素方差分析结果表明，两者影响日棵间蒸发量差异具有统计学意义，主要是秸秆覆盖使到达地面的净辐射分配发生改变，潜热通量减少，土壤水分蒸发明显减少[9].

结合全生育期的降雨量分布可知，在苗期有效降雨较少（P <5 mm），覆盖与不覆盖的蒸发量差异不明显；在有显著降雨后，两处理日蒸发量均有增加的现象，但影响持续时间较短，且覆盖在抑制蒸发上表现出较强的优势，同时对比玉米的各生育期可看出降雨对夏玉米生育初期的棵间蒸发影响较大，归因于降雨提高了土壤含水率，在对照达到 31. 5% 高含水率下土壤蒸发处于蒸发的第一阶段即大气蒸发力控制阶段，棵间蒸发量主要受气象因素影响，由于秸秆覆盖改变了下垫面的粗糙度，阻碍到达土壤表面的净辐射，改变农田近地层微气候[13]，减弱大气蒸发能力，影响了气象要素对棵间蒸发的效应. 说明秸秆覆盖可显著抑制第一阶段的蒸发.

2.2　累积蒸发量变化规律

图 2 给出了玉米累积蒸发量 E_i 与玉米播种后天数 t 的关系函数变化过程. 在整个蒸发过程中，两处理土壤累积蒸发量均随时间的增加而增大，秸秆覆盖下土壤累积蒸发量较小，由图 2 可看出拟合曲线斜率较大，玉米生育初期土壤累积蒸发量增加较快，这一时期主要是地面覆盖度较小，且降雨量较大，提高了土壤含水率，土壤蒸发强，生育中后期增长较缓慢，此时期玉米同时进行营养生长和生殖生长，是作物生长发育最旺盛的阶段，蒸腾作用较强. 图中箭头所指代表有较大降雨（P >40 mm），在显著降雨之后棵间蒸发量均有较大的波动，累积蒸发量向上偏离拟合曲线，说明降雨对累积蒸发量影响较大.

从图 2 可以看出土壤累积蒸发量随时间的变化趋势符合公式 $E_i = at^b$，其中 a，b 为模型参数. 表 1 给出了拟合曲线的各参数值，拟合值与实测值相关系数（R^2）均达到 0. 990 0 左右，具有良好的相关性，

幂函数型曲线很好地拟合了二者之间的关系.

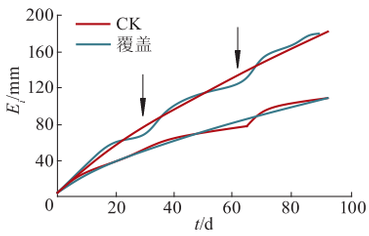


图2 玉米棵间累积蒸发量变化

Fig. 2 Change of maize cumulative evaporation capacity

表1 土壤累积蒸发量与时间的拟合曲线参数

Tab. 1 Fitting parameters of dynamic curves for maize cumulative evaporation capacity

处理	模型参数		相关系数
	a	b	R^2
覆盖	5.22	0.67	0.989 8
CK	5.61	0.77	0.993 7

2.3 不同生育期棵间蒸发与田间蒸散比例变化

表2为玉米各生育期棵间蒸发与蒸散量的变化情况. 采取适宜的农田保墒保水措施对于减少农田无效耗水有明显作用，由表2可以看出全生育期的田间蒸散量与有效降雨量，在覆盖处理下降雨能得到充分的利用，鉴于华北地区气候类型，降雨主要集中在玉米生育期的前期和后期，秸秆覆盖提高了土壤的蓄水能力同时减少地面的裸露程度，双重作用提高了降雨的利用效率；土壤棵间蒸发占总蒸散量的比例全生育期分别是33.3%，40.8%；抑蒸率也随着时间的推移在逐渐增长，苗期－拔节期，覆盖比CK减少了33%的蒸发量，但差异不具有统计学意义($P=0.133$)，拔节－抽雄期、抽雄－灌浆期、灌浆－成熟期分别减少56.3%，47.5%，43.2%，差异在0.05水平下具有统计学意义，除了有覆盖的因素，主要还受叶面积指数、田间表层土壤特性、气象要素等的影响.

由表2可明显看出，无论覆盖与否，随着作物的生长，土面逐日棵间蒸发量在逐日降低，原因是随着叶面积指数的增加，作物转入旺盛的生殖生长和产量形成阶段，需水量大，叶面蒸腾在阶段耗水中占据重要地位，更多的水分从无效耗水转变为有效耗水，而覆盖较不覆盖提高了土壤水的利用率.

表2 玉米各生育时期棵间蒸发与蒸散量变化

Tab. 2 Evapotranspiration and soil evaporation during different growing stages of maize

生育期	起止日期	处理	E/mm	ET/mm	T/mm	E/ET/%	P/mm
拔节期	06.27—08.07	覆盖	59.61	100.89	41.28	59.1	178.82
		CK	88.73	129.30	40.57	68.6	
抽雄期	08.08—08.15	覆盖	6.78	21.18	14.40	32.0	17.27
		CK	15.50	42.00	26.50	36.9	
灌浆期	08.16—08.26	覆盖	6.93	44.26	37.32	15.7	5.84
		CK	13.20	50.00	36.80	26.4	
成熟期	08.27—10.03	覆盖	36.00	136.81	100.81	26.3	106.17
		CK	63.33	203.55	140.22	31.1	
全生育期	07.03—10.03	覆盖	109.33	303.14	193.81	33.3	308.10
		CK	180.76	424.86	244.09	40.8	

2.4 土壤表面覆盖度对棵间蒸发与作物蒸散比值的影响

图3,4为叶面积指数及其与E/ET的关系. 分析可知，秸秆覆盖通过促进作物生长，提高土壤覆盖度来抑制棵间蒸发，同时叶面积指数增大，叶片数多，蒸腾能力增强，E/ET相对减小.

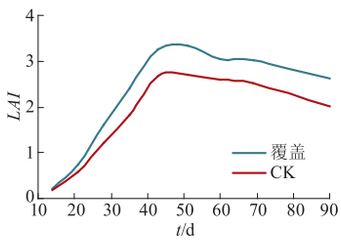


图3 叶面积指数变化

Fig. 3 Change of maize leaf area index

叶面积指数LAI可用来反映作物的生长状况，其变化体现了作物生长发育的不同状态，与作物的光合作用、作物蒸发、蒸散等过程密切相关，是应用于作物监测、估产和病害评价的关键生态参数之一[14]. 由图3可看出叶面积指数随出苗天数的变化趋势与前人的研究具有一致性[12-14]，从播种－拔节期是线性增长期，且增长缓慢，拔节－抽雄期图中两曲线的斜率增大，呈快速增长，直至达到最大值，覆盖处理最大值为3.35，而对照为2.70，抽雄－成熟期先表现出相对稳定而后开始下降. 两处理在整个生育期的变化趋势相同，覆盖的LAI始终比对照的大，且差异具有统计学意义，说明覆盖促进了作物生长发育.

图4可以看出，根据实测资料回归分析得出两处理E/ET和LAI之间存在较好的指数函数关系且决定系数R^2呈现出显著的相关性. 叶面蒸腾作用T

随着 *LAI* 增大而增强，同时 *E* 能力相对减弱. 对照处理 *E/ET* 与 *LAI* 的指数函数关系的结果与王幼奇等[14]、孙景生等[15]和高鹭等[16]的研究结果相符合. 得出覆盖处理和不覆盖处理条件下，棵间蒸发占蒸散量的比值与叶面积指数的相关系数分别是 0.709 和 0.846. 在 *LAI* < 1 时，两者之间的 *E/ET* 差异较大，达到 19.7%，此阶段叶面积较小，地面裸露大，主要以土面蒸发为主，覆盖处理抑制棵间蒸发，因此 *E/ET* 相对 CK 减小. 随着叶面积指数的增大，两处理间差异相对减小，作物接受太阳辐射面积增大，蒸腾作用增强，再加上叶面积对辐射的阻截增大，*E/ET* 逐渐减小. 由图 4 可以看出抽雄到灌浆期叶面积达到最大值，这一时期 *E/ET* 减速较快；当叶面积指数维持在 2.0 ~ 2.5 时，覆盖处理对 *E/ET* 影响不具有统计学意义.

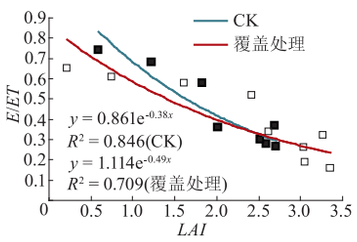


图 4　*E/ET* 与叶面积指数之间的关系

Fig. 4　Relationship between *E/ET* and leaf area index

3　结　论

秸秆覆盖减缓了降雨对土壤的冲击，保护了表层土壤的结构，促进水分的入渗，同时提高了土壤的保水能力，增加土壤的贮水，降低地表径流，提高土壤含水率；同时秸秆覆盖还阻碍下层土壤与近地面大气之间的联系，减少水热交换，从而使棵间蒸发量明显减小，农田水分利用效率得到提高.

1）秸秆覆盖显著降低了土壤棵间蒸发，覆盖比 CK 减少了 33% 的蒸发量，拔节 - 抽雄期、抽雄 - 灌浆期、灌浆 - 成熟期相对于 CK 分别减少 56.3%，47.5%，43.2%；棵间蒸发量占总蒸散量的比例分别为 33.3%，40.8%，提高了农田水分的利用效率，夏玉米产量增加 155 kg/hm^2 左右.

2）华北平原夏玉米棵间累积蒸发量与时间具有良好的幂函数型关系，随着时间增加而增加，拟合曲线为估算不同处理玉米各生育期的灌溉量提供了参考，对照处理棵间累积蒸发量在同一时间段显著高于秸秆覆盖的累积蒸发量.

3）华北平原夏玉米棵间蒸发与总蒸散量的比例全生育期覆盖处理显著低于对照处理；两处理的 *LAI* 在整个生育期的变化趋势相同，但覆盖的 *LAI* 显著高于对照处理；由于秸秆覆盖处理促进了作物生长，增加了地面的覆盖度，对各生育时期的 *E/ET* 产生影响，减少农田水分中的无效耗水，提高农田水分的利用效率.

免耕秸秆覆盖是一项较合理的节水、增产的农艺措施. 由于在整个生育期内降雨量充足，所以对于较干旱年份覆盖处理的影响，需要进一步研究，免耕秸秆覆盖作用可能需要通过长期试验结合不同降雨年型进行研究，具有较好的实践意义.

参考文献(References)

[1] 张光辉，连英立，刘春华，等. 华北平原水资源紧缺情势与因源[J]. 地球科学与环境学报，2011，33(2)：172 - 176.
ZHANG Guanghui，LIAN Yingli，LIU Chunhua，et al. Situation and origin of water resources in short supply in North China Plain[J]. Journal of earth sciences and environment，2011，33(2)：172 - 176. (in Chinese)

[2] 王学渊，赵连阁. 中国农业用水效率及影响因素——基于 1997—2006 年省区面板数据的 SFA 分析[J]. 农业经济问题，2008(3)：10 - 18，110.
WANG Xueyuan，ZHAO Lian′ge. Agricultural water efficiency and the causal factors—a stochastic frontier analysis based on Chinese Provincial Panel Data 1997—2006[J]. Issues in agricultural economy，2008(3)：10 - 18，110. (in Chinese)

[3] 李艳，刘海军，黄冠华. 麦秸覆盖条件下土壤蒸发阻力及蒸发模拟[J]. 农业工程学报，2015，31(1)：98 - 106.
LI Yan，LIU Haijun，HUANG Guanhua. Modeling resistance of soil evaporation and soil evaporation under straw mulching[J]. Transactions of the CSAE，2015，31(1)：98 - 106. (in Chinese)

[4] 员学锋，吴普特，汪有科，等. 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[J]. 农业工程学报，2006，22(7)：22 - 26.
YUAN Xuefeng，WU Pute，WANG Youke，et al. Soil moisture conserving irrigation under straw mulch with no-tillage[J]. Transactions of the CSAE，2006，22(7)：22 - 26. (in Chinese)

[5] 董智. 秸秆覆盖免耕对土壤有机质转化积累及玉米生长的影响[D]. 沈阳：沈阳农业大学，2013.

[6] 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.

ZHANG Hailin, CHEN Fu, QIN Yaodong, et al. Water consumption characteristics for summer corn under no-tillage with mulch[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 36 – 40. (in Chinese)

[7] 雷金银,吴发启,王健,等. 保护性耕作对土壤物理特性及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 40 – 45.
LEI Jinyin, WU Faqi, WANG Jian, et al. Effects of conservation tillage on soil physical properties and corn yield[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 40 – 45. (in Chinese)

[8] 赵娜娜,刘钰,蔡甲冰. 夏玉米生育期叶面蒸腾与棵间蒸发比例试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(2): 5 – 8.
ZHAO Nana, LIU Yu, CAI Jiabing. Experimental research on the ratio between evaporation and transpiration of maize[J]. Journal of irrigation and drainage, 2009, 28(2): 5 – 8. (in Chinese)

[9] 胡实,谢小立,王凯荣. 秸秆覆盖对夏玉米田棵间蒸发和近地层气象要素的影响[J]. 中国农业气象, 2008, 29(2): 170 – 173.
HU Shi, XIE Xiaoli, WANG Kairong. Influence of straw mulching on soil evaporation in summer maize field and meteorological elements close to ground[J]. Chinese journal of agrometeorology, 2008, 29(2): 170 – 173. (in Chinese)

[10] 王兴繁,胡顺军,田长彦,等. 塔里木灌区棉田蒸散与棵间蒸发变化规律[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 74 – 78.
WANG Xingfan, HU Shunjun, TIAN Changyan, et al. The changing law of the diurnal evapotranspiration and soil evaporation in cotton field of Tarim irrigation area[J]. Agricultural research in the arid areas, 2012, 30(6): 74 – 78. (in Chinese)

[11] 张彦群,王建东,龚时宏,等. 滴灌条件下冬小麦田间土壤蒸发的测定和模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 91 – 98.
ZHANG Yanqun, WANG Jiandong, GONG Shihong, et al. Measuring and modeling of soil evaporation for winter wheat with drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 91 – 98. (in Chinese)

[12] WANG Jiandong, GONG Shihong, XU Di, et al. Impact of drip and level-basin irrigation on growth and yield of winter wheat in the North China Plain[J]. Irig sci, 2013, 31(5): 1025 – 1037.

[13] 张旭东,蔡焕杰,付玉娟,等. 黄土区夏玉米叶面积指数变化规律的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 26 – 29.
ZHANG Xudong, CAI Huanjie, FU Yujuan, et al. Study on leaf area index of summer maize in loess areas[J]. Agricultural research in the arid areas, 2006, 24(2): 26 – 29. (in Chinese)

[14] 王幼奇,樊军,邵明安. 陕北黄土高原雨养区谷子棵间蒸发与田间蒸散规律[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 6 – 10.
WANG Youqi, FAN Jun, SHAO Ming′an. Rules of soil evaporation and millet evapotranspiration in rain-fed region of Loess Plateau in Northern Shaanxi[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 6 – 10. (in Chinese)

[15] 孙景生,康绍忠,王景雷,等. 沟灌夏玉米棵间土壤蒸发规律的试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 28 – 32.
SUN Jingsheng, KANG Shaozhong, WANG Jinglei, et al. Experiment on soil evaporation of summer maize under furrow irrigation condition[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11): 28 – 32. (in Chinese)

[16] 高鹭,胡春胜,陈素英,等. 喷灌条件下冬小麦田棵间蒸发的试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 183 – 185.
GAO Lu, HU Chunsheng, CHEN Suying, et al. Experimental study on soil evaporation in winter wheat field under sprinkling irrigation condition[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(12): 183 – 185. (in Chinese)

(责任编辑 徐云峰)