

陇中半干旱区地膜开孔率对玉米蒸腾的影响

董军, 党慧慧, 岳宁, 董阳, 魏国孝

(兰州大学 资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为了解地膜开孔率对玉米蒸腾的影响和玉米蒸腾耗水与气象因子的关系, 为农业灌溉和地膜栽培技术提供理论依据, 采用基于热平衡法的茎流计对不同地膜开孔率条件下的玉米蒸腾速率进行了连续监测, 并使用相关性分析和主成分分析方法对蒸腾资料和同步的气象资料进行分析研究。结果表明: 玉米蒸腾在晴天和阴天分别为单峰曲线和多峰曲线; 蒸腾速率随开孔率的增大而减小, 且开孔率越大蒸腾在峰值停留的时间越长; 相对蒸腾效率与开孔率呈现出指数关系; 影响玉米蒸腾的主要气象因子依次是太阳辐射、空气温度、相对湿度; 覆盖地膜是通过改变膜内温度和相对湿度, 从而改变玉米根部的小气候来影响玉米蒸腾的。

关键词: 茎流计; 地膜开孔率; 玉米蒸腾; 半干旱区

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)05-0235-06

Impact of film open ratio on transpiration of maize in semi-arid area of Longzhong

DONG Jun, DANG Huihui, YUE Ning, DONG Yang, WEI Guoxiao

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems of Ministry of Education,
College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to know the influence of film open ratio on the transpiration rate of maize, and the relation between water consume of maize transpiration and climate factors so as to provide theory basis for agricultural irrigation and film cultivation technique, the paper used stem flow gauge which is based on heat balance method to continually measure the transpiration rate of maize under different conditions of film open ratio, and analyzed the data of transpiration and climate. Results showed that the maize transpiration respectively presents single peak curve and multi peak curve in sunny days and cloudy days. The transpiration rate of maize decreases with the increase open ratio. The more the open ratio, the longer of time the transpiration stay at peak value. There is an exponential relationship between transpiration efficiency and film open ratio. The main climate factors which affect the transpiration rate of maize are in turn solar radiation > temperature > relative humidity. The film can change the micrometeorology of maize root area to affect its transpiration rate through change air temperature and relative humidity in scope of film.

Key words: stem flow gauge; film open ratio; maize transpiration; semi-arid area

蒸腾是植物体内重要的生理活动, 不仅可以以潜热的方式释放大量热量使植物体内温度保持在正常水平, 还可以促进植株对水分和营养物质的吸收和传输, 保证植物进行光合作用的需要^[1-2]。茎流传感器是目前公认的用于直接测量单株植物水分利用状况最精确、最可靠的传感器, 是进行植物水分关系和植物生物量估算等研究的重要工具^[3], 主要包

括热脉冲法、热平衡法和热扩散法。国内已有不少学者使用茎流计对番茄 (*Lycopersicon esculentum*)^[4]、杏树 (*Prunus armeniaca* L.)^[5] 和苹果树 (*Malus sieversii* (Led.) Roem.)^[6] 等进行了研究, 均取得了满意的结果, 刘德林等^[7] 做了茎流法对玉米 (*Zea mays*) 蒸腾规律的研究, 表明茎流计所测得的玉米茎流速率可较准确的表示玉米蒸腾速率, 本研

收稿日期: 2015-05-18; 修回日期: 2015-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41471023); 国家级大学生创新创业训练项目 (860496)

作者简介: 董军 (1989-), 男, 河南三门峡人, 硕士研究生, 主要从事干旱区水资源与环境方面的学习和研究。

通讯作者: 魏国孝 (1966-), 男, 甘肃会宁人, 副教授, 研究方向为干旱区水资源与环境。

究中可用测得的茎流速率代表玉米蒸腾速率。

地膜覆盖作为一项增产措施,近些年来在我国北方地区农业生产中得到了广泛的应用,一些地方覆盖率已经达到了 90%^[8]。地膜覆盖能改善土壤水热状况、提高水分利用率、减少水土流失,以及促进土壤对氮素的吸收^[9-10]。地膜在使用过程中受刮风、冰雹、动物活动和植物出苗等的影响,会遭到不同程度的破坏,地膜开孔率也处于变化之中。耿桂俊等^[11]通过研究不同覆盖方式对番茄的影响,得出地膜覆盖提高了土壤温度且地膜覆盖对番茄的土壤水分含量有明显提高,门旗等^[8]在对不同地膜开孔率下土壤蒸发的研究中指出土壤的棵间蒸发随着地膜开孔率的增大而成指数关系增加,然而对农田覆膜开孔率与作物蒸腾的定量研究比较少见。在我国西北干旱地区,干旱在很大程度上影响了农作物的产量,严重制约着当地的农业经济。本文以当地主要农作物——玉米为研究对象,结合茎流计数据和同步观测的气象数据,试图研究地膜开孔率对玉米蒸腾的影响和玉米蒸腾耗水与气象因子的关系,为陇中半干旱区的农业灌溉和地膜栽培技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验田位于兰州大学半干旱区农业生态系统试验站(35.42°N,105.24°E,海拔 1 951 m),研究区属于黄土高原丘陵沟壑区,气候类型为典型的暖温带半干旱季风气候,年平均气温 7.9℃,年平均降水量 340 mm,主要集中在 7、8、9 月,年平均蒸发量 1 800 mm,无霜期约为 136~186 d,日夜温差大,光照充足。冬季干旱多风,夏季炎热,地表水稀少,地下水位深,主要包括内山旱地、塬旱地以及川旱地,耕地严重缺水,粮食作物以玉米为主,主要气象灾害是干旱。试验田为常规种植农田,玉米行距和株距分别为 0.5 和 0.4 m。

1.2 试验设计与数据处理

在直径 32cm、高 40cm 的同规格塑料水桶钻孔后盛土,土质为壤土且经过 2 mm 筛网处理,土层与水桶口近乎平齐。所有水桶种植同一品种玉米(陇单 4 号),播种日期为 2013 年 4 月 21 日,对每个水桶灌溉相同的水量。待玉米中期后,挑选长势较好的玉米包裹茎流计,确保茎流计能正常工作后实时观测其茎流数据。每株玉米覆盖厚 0.007 mm 的塑料薄膜并开孔。实验处理的开孔率为 5%、20%、40% 和 100%,其中 100% 开孔率作为对照,本研究

中地膜开孔率定义为地膜上开孔的面积与桶口面积之比。玉米生育期间人工灌水,其他条件均保持在自然状态。从 8 月 5 日-9 月 3 日,玉米处于乳熟期,其蒸腾作用强烈且茎秆较稳定,此时包裹茎流计对植株的茎损伤较小。

玉米蒸腾数据由 Dynamax 茎流传感器自动记录(每半小时自动记录一次),与其同步的太阳辐射、气温、相对湿度和风速等气象数据从玉米植株附近的小型自动气象站获得(每 15 min 记录 1 次)。定期将测量数据用笔记本电脑统一收集并带回用 flow-32 自带的 excel 表格和 SPSS13.0 进行分析处理。

1.3 茎流计原理

基于热平衡的茎流计原理和作物的蒸腾作用密切相关。作物根部从土壤中吸收水分并通过茎秆传输到作物顶层和叶片,通过叶片的气孔散发到大气当中。在此过程中,作物茎中的液体一直处于流动状态。当作物茎中流动的液体在某处被注入热脉冲后,这部分热量将通过以下几种途径被消耗掉:一部分随茎内水分的向上运动而向上移动(Q_u);一部分与上下部的水体发生热交换(Q_c);一部分以辐射的形式散发到周围(Q_r);还有一部分以能量的形式储存在植株的茎秆内(Q_s)。在实验过程中,由于玉米的茎秆很细,其茎内储存的热量可忽略不计,茎内热平衡方程为:

$$P_{in} = Q_u + Q_r + Q_c \quad (1)$$

式中: P_{in} 代表热源恒定功率。其中 Q_r 和 Q_c 分别由下式计算:

$$\begin{cases} Q_r = k_{sh} C_h \\ Q_c = k_{st} A d_{T_u}/d_x + k_{st} d_{T_d}/d_x \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_h 、 k_{sh} 分别代表辐射热电堆的电压, mV 和探头热导常数; k_{st} 代表茎秆热传导率, W/(m·k); A 表示茎秆截面积, m²; d_{T_u}/d_x 和 d_{T_d}/d_x 分别代表茎秆内向上和向下传导的温度梯度, °C/m。根据上面两式和能量平衡方程,可得到计算茎流量的公式:

$$F = [P_{in} - k_{st} A (d_{T_u}/d_x + d_{T_d}/d_x) - k_{sh} C_h] / (C_p d_T) \quad (3)$$

式中: F 为蒸腾速率, g/h; C_p 为水的比热容, J/(g·°C); d_T 代表两测点间液流温度变化, °C, 其他参数同上。

2 结果与分析

2.1 地膜开孔率与玉米蒸腾速率的关系

结合测量时段的天气情况,本实验主要研究能代表西北干旱半干旱区的典型晴天和阴天条件下玉

米蒸腾在不同开孔率条件下的日变化特征。结果如图 1 所示,且晴天数据对应的日期为 2013 年 8 月 18 日;阴天数据对应的日期是 2013 年 8 月 24 日。

2.1.1 玉米蒸腾日变化趋势 晴天玉米蒸腾日变化过程为单峰曲线,蒸腾启动时间为 7:00,而后蒸腾速率开始增加,10:00 – 12:00 迅速增加,于 13:00 – 14:00 达到峰值,经过较短峰值之后开始大幅下降,22:00 减小至较低水平,玉米蒸腾进入微弱阶段,并在晚间维持在最低值。玉米蒸腾在峰值附近会持续波动,且存在突然减小后增加的“午休”现象,

王淑庆等^[12] 认为大气蒸发能力过高时会出现蒸腾速率大于根系吸水速率,致使导管中的水柱出现空穴而时断时续,李会等^[13] 认为是中午温度过高,太阳辐射过强导致作物叶片气孔关闭,使得作物的蒸腾速率稍有减弱。在阴天天气下,玉米蒸腾启动较早,6:00 – 7:00 蒸腾开始启动,峰值比晴天低且持续时间长,夜晚 24:00 才减小到夜间的微弱状态。同白天相比,阴天的蒸腾值较小,且呈不规则的多峰曲线。

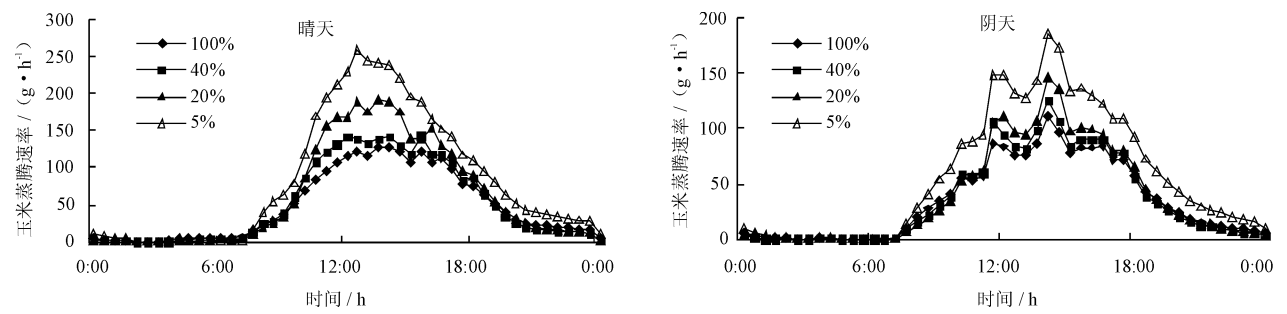


图 1 不同天气、不同开孔率条件下玉米蒸腾速率日变化

2.1.2 地膜开孔率对玉米蒸腾速率的影响 由于玉米蒸腾在峰值附近一直处于波动之中,为了研究玉米蒸腾的强度,本研究中规定玉米蒸腾速率在最大值的 90% 以上称为峰期,开孔率为 5%、20%、40% 和 100% 的玉米蒸腾峰值分别为 259、192、144 和 127 g/h,处于峰期的时间分别为 1.5 h、2 h、3 h 和 4.5 h。比较不同开孔率下玉米的蒸腾发现,在同一时刻玉米的蒸腾速率随着开孔率的增大而减小,且开孔率越大,在峰值停留的时间也越长。阴天玉米的蒸腾呈不规则的多峰曲线,且波动较大,峰期现象不明显,但是玉米蒸腾峰值随开孔率的变化趋势同白天相同。

2.2 玉米日蒸腾量与地膜开孔率的关系

为探讨地膜开孔率与玉米日蒸腾量的关系,本实验取 3 个晴天和 3 个阴天的玉米日蒸腾量平均值进行研究。各开孔率玉米在晴天和阴天的日蒸腾量

如表 1 所示,晴天条件下开孔率为 5%、20%、40% 和 100% 的玉米日蒸腾量分别为 1 680、1 201、1 038 和 947 g,而阴天条件下分别为 1 243、828、773 和 756 g。在晴天开孔率为 5%、20% 和 40% 的玉米日蒸腾量分别比开孔率为 100% 玉米增加 733、254 和 91 g;而在阴天则分别增加了 487、72 和 17 g。不同开孔率间对比得出随着开孔率减小,蒸腾积累量的增加速度加快,晴天和阴天日蒸腾量对比得出晴天覆膜玉米和不覆膜玉米之间的蒸腾积累量的差别更大,说明天气对玉米蒸腾的影响很大,也说明晴天覆膜的效果更明显。

图 2 为相对蒸腾效率 (E_i/E_0) 与开孔率的关系,其中 E_0 表示地膜开孔率为 100% 条件下的玉米日蒸腾量, E_i 为其他开孔率条件下玉米日蒸腾量。由 E_i/E_0 的比值与开孔率的回归分析得: $y = 0.9395x^{-0.1824}$,其中 $R^2 = 0.8852$ 。

表 1 不同天气不同开孔率下玉米日蒸腾量

开孔率/%	阴天				晴天			
	100	40	20	5	100	40	20	5
日蒸腾量/g	836	877	945	1389	1155	1262	1484	2015
	779	787	857	1256	777	851	959	1388
	652	655	681	1084	910	1000	1161	1637
平均值/g	756	773	828	1243	947	1038	1201	1680

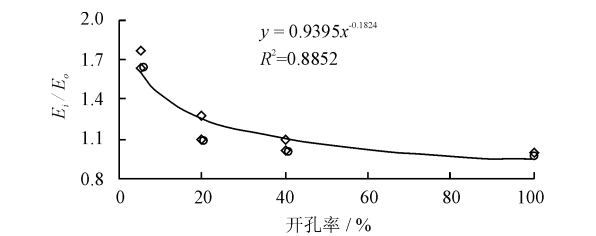


图2 玉米 E_t/E_0 的比值随开孔率变化

2.3 玉米蒸腾与气象因子的关系分析

由上述结果得知,玉米的蒸腾速率不仅受地膜开孔率的影响,同时也受天气的影响。以下将从太阳辐射、空气温度、相对湿度和风速几个方面研究气象因子对玉米蒸腾的影响,不同天气条件下的各气象因子变化如图3所示。

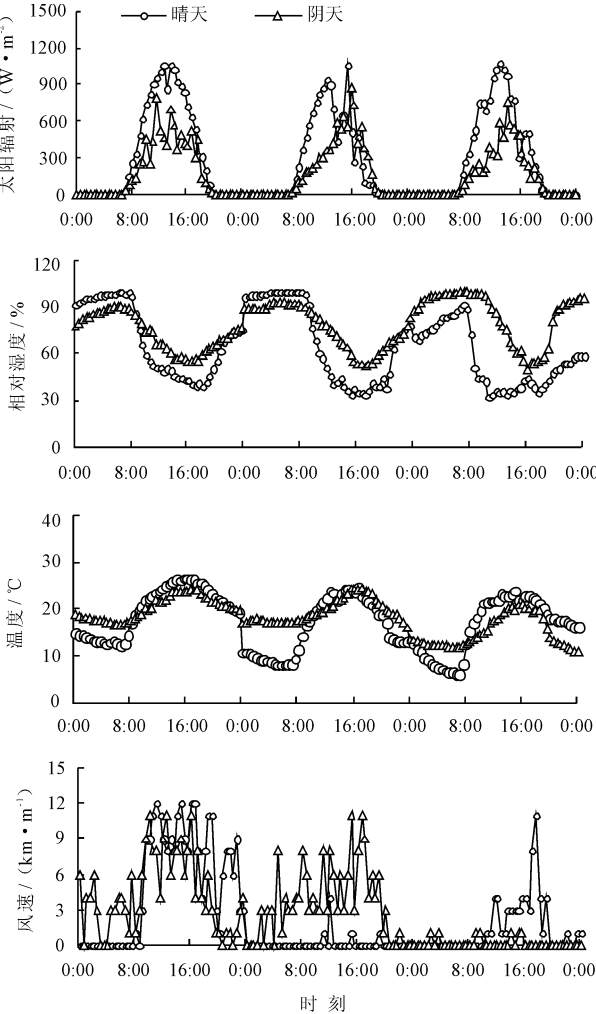


图3 不同天气条件下气象因子日变化

2.3.1 气象因子的变化 从图3可以看出太阳辐射的变化与玉米蒸腾的日变化规律相同,夜间太阳辐射为零,早上7:00开始增加,13:00达到峰值后

逐渐减小,20:00减小为零,其表现为单峰曲线,与晴天的太阳辐射相比,阴天时太阳辐射启动较晚且峰值较低。在晴天,温度的变化趋势与玉米蒸腾趋势相一致,只是温度峰值出现在16:00,与太阳辐射相比存在滞后性,这是因为当太阳辐射最强时,地面吸收太阳辐射仍在增加,地面向空气发射长波辐射,使空气温度继续增加,当地面接收到的太阳辐射和地面发射的长波辐射相等时空气温度才会达到最高点,尤其是在我国西北地区,太阳辐射比较强烈,同时海拔较高,会使这种滞后性加强。相对湿度的变化与温度恰好相反,温度最低的时候相对湿度最高。阴天的温度和相对湿度变化趋势同晴天一致,只是阴天的数据浮动范围较小,两种天气下的风速随时间的变化趋势不明显,总体表现为白天风速大而夜晚小。

2.3.2 气象因子和玉米蒸腾的相关关系 不同天气各开孔率下玉米蒸腾与气象因子的相关性分析结果如表2所示,两种天气下各开孔率的玉米蒸腾与气象因子之间均显著性相关。

在晴天各气象因子与蒸腾的相关系数大小顺序为太阳辐射>温度>相对湿度>风速,而在阴天则表现为太阳辐射>温度=相对湿度>风速,说明在生长期对茎流速率的变化引起显著性作用的主要气象因子是太阳辐射、空气温度和相对湿度,而风速对其影响较小。与阴天相比,晴天玉米与太阳辐射的相关系数较阴天低,而与温度和相对湿度的相关系数则较高,说明在晴天相对湿度和温度对玉米蒸腾的影响较大。

不同开孔率间对比发现在晴天开孔率为5%、20%和40%的玉米蒸腾与气象因子的相关系数比较接近,而与开孔率为100%玉米差别较大,不覆膜玉米的蒸腾与太阳辐射的相关系数比覆膜低,而与温度和相对湿度的相关系数比覆膜条件下略高,这可能是由于膜内温度比膜外高,且可以保持在较稳定的状态,导致其与玉米蒸腾的相关性较低。这说明覆盖地膜可能是通过改变膜内温度和相对湿度来影响玉米茎流的。而在阴天不同开孔率玉米与气象因子的相关系数都比较接近。

由上述可知,玉米蒸腾的变化是对多种气象因子的综合响应。为进一步验证气象因子对玉米蒸腾的影响,将玉米蒸腾量作为一个因子和各气象因子一起进行主成分分析(PCA)。得到特征值、解释率(表3)和主成分的因子载荷(表4)。

表 2 不同开孔率条件下玉米蒸腾速率与气象因子的相关关系

天气	开孔率/%	太阳辐射 SR	相对湿度 RH	温度 T_a	风速 V_w
晴天	5	0.908 **	-0.749 **	0.819 **	0.572 **
	20	0.898 **	-0.735 **	0.804 **	0.596 **
	40	0.904 **	-0.76 **	0.828 **	0.602 **
	100	0.88 **	-0.787 **	0.86 **	0.612 **
阴天	5	0.93 **	-0.677 **	0.677 **	0.516 **
	20	0.939 **	-0.686 **	0.685 **	0.534 **
	40	0.943 **	-0.661 **	0.667 **	0.538 **
	100	0.934 **	-0.682 **	0.683 **	0.527 **

注: * * 表示 0.01 显著性水平,自由度为 144。

经 PCA 分析,按照特征值大于 1 选取一个主成分,晴天和阴天的特征值分别为 3.513 和 3.556,解释率分别为 70.261% 和 71.111%。从表 4 看出在晴天和阴天,太阳辐射、相对湿度、温度和玉米蒸腾对主成分的因子载荷都比较大且相差不大,而风速的因子载荷值比其他因子都较小,说明玉米蒸腾和太阳辐射、相对湿度、温度都在一个主成分上,表明玉米蒸腾受太阳辐射、相对湿度和温度的影响比较大。而风速对主成分的因子载荷值较小,可理解为风速对主成分的贡献较小,对玉米蒸腾的影响也较小。这个结果与相关性分析结果一致。

表 3 主成分分析环境因子特征值

天气	主成分	特征值	解释率/%
晴天	1	3.513	70.261
阴天	1	3.556	71.111

表 4 主成分的因子载荷

	太阳辐射	相对湿度	温度	风速	玉米蒸腾
晴天	0.865	-0.866	0.897	0.673	0.869
阴天	0.868	-0.860	0.897	0.683	0.890

3 讨 论

作物蒸腾是一个复杂的生理过程,既受作物本身形态结构和生理状况的制约,也受外界环境的影响。本研究得到的结果是地膜覆盖可以增加玉米的蒸腾速率,且玉米的蒸腾随着地膜开孔率的增大而减小。原因是地膜开孔率的变化影响玉米根部微环境变化,主要是改变膜内温度和湿度,从而引起玉米的根系吸水变化,最终导致玉米蒸腾速率的变化。本研究得到的结论与其他研究得到的结论相一致。

门旗等^[8]通过研究地膜覆盖率对裸地土壤蒸发的影响,得出在土壤含水量一定时,土壤水分的蒸发量是随着地膜开孔率的增大而呈指数关系增大;李洪勋^[14]得出的结论是覆膜玉米蒸腾速率和干物质积累量等重要生理指标明显优于露地玉米。王荣堂等^[1]和李毅^[15]等的研究结果也表明地膜覆盖可以防止水分的垂直蒸发而提高土壤湿度,有利于玉米的蒸腾作用。

与其他研究结果(表 5)相同,本实验影响玉米蒸腾的主要因素是太阳辐射、空气温度和相对湿度。其中太阳辐射是对玉米蒸腾影响最大的环境因子,相对湿度是限制玉米蒸腾的关键因素。本研究的结果可以代表黄土高原半干旱区玉米的蒸腾规律。在黄土高原干旱半干旱区玉米种植时应该减小地膜的开孔率或采取其他措施,将无效的棵间蒸发转化为有效的玉米蒸腾以提高玉米产量。

表 5 不同条件下作物与环境因子的相关关系比较

研究地	天气	植物	气象因子	参考文献
山东烟台	晴天	玉米	$SR > T_a > V_w > RH$	[7]
甘肃会宁	晴天	玉米	$SR > T_a > RH$	[16]
新疆阿克苏	晴天	枣树	$SR > T_a > RH$	[17]
甘肃武威	阴天	葡萄	$T_a > RH > SR$	[18]
内蒙科尔沁	晴天	玉米	$SR > RH > T_a$	[19]
河西沙漠	晴天	玉米	$T_a > RH > VPD$	[20]
甘肃会宁	晴天	玉米	$SR > T_a > RH$	本研究

4 结 语

(1)玉米在晴天的蒸腾呈单峰曲线,在阴天则呈不规则的多峰曲线,玉米的蒸腾速率随开孔率的减小而增大,开孔率越大的玉米蒸腾峰值越低,且在峰值的持续时间越长。

(2)晴天条件下开孔率为 5%、20%、40% 和 100% 的玉米日蒸腾量分别为 1 680、1 201、1 037 和 947 g,而阴天条件下分别为 1 243、827、773 和 755 g。相对蒸腾效率与开孔率的关系为 $E_i/E_0 = 0.9395x^{-0.1824}$ 。

(3)太阳辐射、温度和相对湿度是影响玉米蒸腾的主要气象因子,覆盖地膜是通过改变玉米根部的小气候,主要改变膜内温度和相对湿度来影响玉米蒸腾的。在实际生产中应尽量减小地膜的开孔率,以提高玉米产量。

参考文献:

[1] 王荣堂,张竹青,王有宁. 地膜覆盖对蒸腾蒸发的影响[J]. 湖北农学院学报,2002,22(2):101-103+114.

[2] 李倩,谭雪莲. 旱地植物蒸腾作用研究进展[J]. 甘肃农业科技,2006(10):18-20.

[3] 龙秋波,贾绍凤. 茎流计发展及应用综述[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(4):18-23.

[4] 刘安,刘旭,黄岚等. 基于热平衡法检测植物茎流传感器的标定[J]. 农业工程学报,2010,26(Z1):6-10.

[5] 高峻,吴斌,孟平. 杏树蒸腾与降水和冠层微气象因子的关系[J]. 北京林业大学学报,2010,32(3):14-20.

[6] 孟平,张劲松,王鹤松,等. 苹果树蒸腾规律及其与冠层微气象要素的关系[J]. 生态学报,2005,25(5):1075-1081.

[7] 刘德林,刘贤赵. Greenspan 茎流法对玉米蒸腾规律的研究[J]. 水土保持研究,2006,13(2):134-137.

[8] 门旗,李毅,冯广平. 地膜覆盖对土壤棵间蒸发影响的研究[J]. 灌溉排水学报,2003,22(2):17-20+25.

[9] 张义,谢永生,郝明德,等. 地表覆盖及生理生态因子

对苹果树光合特性的影响[J]. 水土保持通报,2010,30(1):125-130.

[10] 张成娥,梁银丽,贺秀斌. 地膜覆盖玉米对土壤微生物量的影响[J]. 生态学报,2002,22(4):508-512.

[11] 耿桂俊,白岗栓,杜社妮,等. 地表覆盖对河套灌区土壤水热和番茄生长的影响[J]. 水土保持通报,2011,31(2):36-41.

[12] 王淑庆,张岁岐,王小林. 黄土塬区不同栽培模式下玉米蒸腾耗水规律的研究[J]. 中国生态农业学报,2013,21(4):432-439.

[13] 李会,刘钰,蔡甲冰,等. 夏玉米茎流速率和茎直径变化规律及其影响因素[J]. 农业工程学报,2011,27(10):187-191.

[14] 李洪勋,吴伯志. 地膜覆盖对玉米生理指标的影响研究综述[J]. 玉米科学,2004,12(Z1):66-69.

[15] 李毅,王全九,王文焰,等. 覆膜开孔土壤蒸发的水盐分布特征及运移规律研究[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(2):187-193.

[16] 闫业庆,胡雅杰,张旭昇,等. 不同天气条件下玉米生长期茎流变化特性及研究[J]. 中国农村水利水电,2011(10):1-6.

[17] 田盼盼,董新光,刘锋. 干旱区枣树蒸腾规律及其与气象要素的关系[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(2):86-89.

[18] 郑睿,康绍忠,佟玲,等. 不同天气条件下荒漠绿洲区酿酒葡萄植株耗水规律[J]. 农业工程学报,2012,28(20):99-107.

[19] 唐霞,崔建垣,岳祥飞,等. 科尔沁沙地玉米茎流变化规律研究[J]. 水土保持通报,2011,31(2):31-35.

[20] 聂文果,张吨明,徐先英,等. 玉米茎流速率及耗水量研究[J]. 中国农学通报,2009,25(7):230-234.