

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.031

秸秆覆盖条件下滨海土壤蒸发阻力模型研究

孙池涛^{1,2} 邓亚鹏¹ 张俊鹏¹ 孙景生^{2,3} 毛伟兵¹ 孙玉霞¹

(1. 山东农业大学水利土木工程学院, 泰安 271000; 2. 农业农村部作物需水与调控重点实验室, 新乡 453002;
3. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002)

摘要: 为明确秸秆覆盖对土壤蒸发阻力的影响、实现秸秆覆盖条件下的土壤蒸发模拟,以滨海土壤为对象,通过室内模拟试验,确立并构建了不同秸秆覆盖量(0、0.3、0.6、0.9、1.2 kg/m²,分别表示为CK、S1、S2、S3、S4)下的土壤水分蒸发动力学模型和秸秆覆盖模式下的蒸发阻力模型,并根据实测蒸发数据进行了模拟评价。结果表明,表层土壤含水率随时间呈指数型减小趋势,且同一时刻,秸秆覆盖量较大的处理表层土壤含水率较大;土壤蒸发强度随含水率的增加呈指数型增加,土壤累计蒸发量随含水率的降低呈线性增加趋势,拟合直线的决定系数 R^2 均大于0.9,且秸秆覆盖量越大,平均土壤蒸发强度和土壤累计蒸发量均越小;不同秸秆覆盖量下覆盖阻力差异较大,而同一秸秆覆盖量间覆盖阻力差异较小,覆盖阻力随秸秆覆盖量的增加而线性增加,两者呈显著正相关($R^2 = 0.9114$, $p < 0.05$)。根据秸秆覆盖阻力模型模拟的计算土壤蒸发量与实际土壤蒸发量的RMSE为 4.18×10^{-4} mm/min、MAE为 3.85×10^{-5} mm/min、NS为0.90,拟合直线斜率 k 为0.926。说明所建立的秸秆覆盖阻力模型能够准确估算秸秆覆盖模式下的土壤蒸发量。

关键词: 滨海土壤; 秸秆覆盖; 蒸发阻力; 土壤蒸发; 模型模拟

中图分类号: S161.4⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)12-0284-08 OSID: 

Model on Coastal Soil Evaporation Resistance under Straw Coverage

SUN Chitao^{1,2} DENG Yapeng¹ ZHANG Junpeng¹ SUN Jingsheng^{2,3} MAO Weibing¹ SUN Yuxia¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271000, China
2. Key Laboratory of Crop Water Use and Regulation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xinxiang 453002, China
3. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China)

Abstract: Coastal soil was taken as an object in order to clarify the influence of straw coverage amount on soil evaporation resistance in Binhai area, and dynamic model of soil moisture evaporation and coverage resistance model under different straw coverage amount conditions (0 kg/m², 0.3 kg/m², 0.6 kg/m², 0.9 kg/m² and 1.2 kg/m², expressed as CK, S1, S2, S3, S4, respectively) were established, moreover, the measured and calculated evaporation data were evaluated. Results showed that the surface soil moisture was decreased exponentially with time, and the more amount of straw coverage, the higher surface soil moisture; both the soil evaporation rate and cumulative soil evaporation were increased exponentially with the increase of soil moisture. The decrease of soil moisture showed a linear increase trend with time, the determination coefficient R^2 of the fitted line was greater than 0.9, and both the average soil evaporation rate and cumulative soil evaporation amount were decreased with the increase of straw coverage quantity. Coverage resistance under different straw coverage treatment had a large difference, while the difference for coverage resistance in the same straw coverage treatment was small, and the coverage resistance was increased linearly with the increase of straw coverage amount, moreover, the relationship between coverage resistance and straw amount showed a significant positive correlation ($R^2 = 0.9114$, $p < 0.05$). The RMSE, MAE and NS between the simulated and the actual soil evaporation was 4.18×10^{-4} mm/min, 3.85×10^{-5} mm/min, and 0.90, respectively, and the slope k for the simulated and actual soil evaporation fitted line was 0.926, indicating that the calculated straw coverage resistance model can accurately estimate the soil evaporation under straw coverage conditions.

Key words: coastal soil; straw coverage; evaporation resistance; soil evaporation; model simulation

收稿日期: 2020-08-31 修回日期: 2020-09-25
基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2018BEE048)、农业农村部作物需水与调控重点实验室开放基金项目(FIRI202004-0201)、山东省重点研发计划项目(重大科技创新工程)(2019JZZY010727)和国家自然科学基金青年基金项目(31700368)
作者简介: 孙池涛(1987—),男,讲师,博士,主要从事农田土壤溶质运移理论及模拟研究,E-mail: sunchitao@163.com

0 引言

土壤蒸发是陆地水文循环的重要组成部分,也是农田土壤水分消耗的重要途径,同时还是导致土壤盐渍化的重要驱动因素^[1-2]。秸秆覆盖是一种传统的农业节水技术,是解决干旱-半干旱地区土壤缺水问题的重要举措^[3]。研究秸秆覆盖条件下的盐渍化土壤蒸发规律有助于深入理解蒸发在水文循环中的作用,提高土壤蒸发模型的模拟、预测精度,以及揭示秸秆覆盖对土壤水盐的调控机制。秸秆覆盖后,覆盖层对水汽扩散具有阻滞作用,能够延缓水分子由土壤向大气传输的速率^[4];同时,覆盖层还改变了地表反射率、导热率及粗糙度等参数,对近地层土壤热力学性质及水分传输条件产生影响^[5]。

与土壤蒸发计算相关的理论和经验公式已有诸多报道,如赵鸿雁等^[6-7]构建了基于落叶覆盖厚度和土壤含水率估算土壤累计蒸发量和蒸发强度的数学模型;孙景生等^[8]研究指出,玉米棵间土壤相对蒸发强度与表层土壤含水率和作物叶面积指数之间均呈良好的指数函数型关系,灌溉或降雨后 2~3 d 内土壤蒸发强度较大,受大气蒸发力影响明显;郑鑫等^[9]以 Ritchie 模型为基础,结合微型蒸渗仪测定结果确定了适宜于东北盐碱土蒸发的模型参数。此外,研究者还对土壤蒸发过程中的蒸发阻力项进行了计算,指出土壤表面蒸发阻力主要与土壤表层 1~2 cm 内的土壤含水率有关^[10],同时还受到土壤质地、持水特征、温度等因素影响^[11-14]。然而,上述经验公式大多是在特定的气候条件下获得的,其适用条件及模型参数还有待于验证。

目前,秸秆覆盖条件下土壤蒸发模拟、蒸发阻力确定等相关研究已有报道^[15-16],但这些研究多是针对特定覆盖材料的尺寸、厚度及用量等因素获得的,不同秸秆覆盖量条件下的秸秆覆盖阻力变化规律及蒸发模拟研究却鲜有报道。本文研究不同秸秆覆盖量条件下土壤蒸发特性,对现有土壤表面蒸发阻力模型进行模拟筛选,旨在确定适宜的土壤表面蒸发阻力模型和秸秆覆盖阻力模型,为覆盖条件下土壤蒸发模拟预测及制定合理的农业水分管理策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土壤取自滨州市无棣县“渤海粮仓”科技示范区(37°17'~38°3'N,117°42'~118°4'E)0~40 cm 土层,土壤含盐量为 3g/kg,主要以 NaCl 为

主,占总含盐量的 70%~80%。采样区属于温带大陆性季风气候,多年平均气温为 12.3℃,降雨量为 586 mm,蒸发量为 1 800 mm;其中,6—9 月降雨量约占全年总降雨量的 70%。通过吸管法测定土壤各粒级相对含量(表 1),粘粒(粒径 0~0.002 mm)相对含量为 10.75%,粉粒(粒径 0.002~0.05 mm)相对含量为 54.92%,沙粒(粒径大于 0.05 mm)相对含量为 34.33%;土壤质地为粘质壤土(美国制)。本试验中覆盖材料为剪碎的 0.5~1 cm 小麦秸秆。

表 1 试验土壤颗粒组成
Tab.1 Mechanical composition of experimental soil

粒级/mm	0.2 ~2	0.05~ 0.2	0.02~ 0.05	0.01~ 0.02	0.002~ 0.01	0~ 0.002
相对含量/%	1.15	33.18	40.63	9.05	5.24	10.75

1.2 试验设计

本试验采用航空塑料杯(容积 230 mL,杯高 80 mm,上口直径 70 mm,下口直径 50 mm),2 个塑料杯为一套装置(图 1a),上杯底部用电钻均匀打孔(孔径 1 mm),下杯完好嵌套上杯。上杯底部均匀铺设 20 g 粒径为 2 mm 的石英砂(约 5 mm 厚),石英砂上装 230 g 风干土壤(容重为 1.3 g/cm³),上杯顶部预留 0.5 cm 高空间以覆盖秸秆,秸秆量按照 0、0.3、0.6、0.9、1.2 kg/m²(分别表示为 CK、S1、S2、S3、S4)铺设,每个处理重复 20 次。试验时间为 2019 年 12 月 28 日—2020 年 1 月 9 日共计 14 d。试验在山东农业大学水利土木工程实验中心大厅完成,试验期间室内温度为 13~18℃。

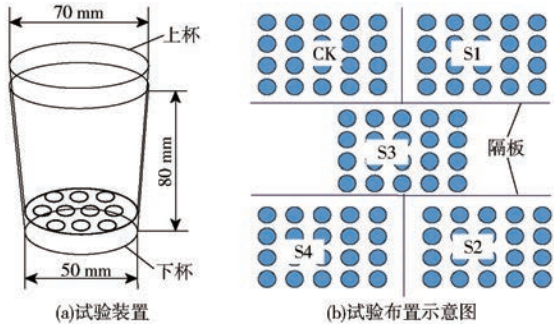


图 1 试验装置及试验布置示意图
Fig.1 Schematic of test device and test layout

1.3 试验流程

为了使每个处理土壤样品盐分浓度一致,试验开始前,向每一套装置中加预先配置好的 5 g/L NaCl 溶液 180 mL(灌水前土壤上方铺设滤纸,以免加水冲坑),入渗过程中及时倒掉下杯搜集的液体,静置 24 h 后,按设计用量覆盖秸秆,秸秆覆盖后,用手轻轻按压秸秆,力求各处理间秸秆压实度保持一致。为避免不同处理间温湿度相互干扰,用高为

50 cm 的泡沫板隔开,试验布置示意图如图 1b 所示。每个处理选择最后 3 组装置称量,根据前后两次称量值计算蒸发量;称量的同时,用红外测温仪 (Testo 型,德国)测定各处理表层温度,用空气温湿度、风速仪 (Testo-608 型,德国)测定每个装置上方 15 cm 处温度、相对湿度和风速;此外,通过破坏性取样测定 0~1 cm 土壤质量含水率 θ_s 。上述指标均按照先密后疏的原则测定,其中土壤蒸发量和土壤质量含水率 θ_s 前期每 4~8 h 取样一次,后期每 12~24 h 取样一次;温度、相对湿度和风速前期每 2 h 监测一次,后期每 4 h 监测一次。土壤质量含水率 θ_s 由于干燥法测定。

1.4 数据处理

1.4.1 土壤蒸发强度

参照 YAMANAKA 等^[17]研究结果,土壤蒸发强度计算式为

$$E=60\frac{q_{vs}-q_{va}}{r_t}\tag{1}$$

其中
$$q_{vs}=\frac{1.323e^{\frac{17.27T_s}{T_s+237.3}}}{T_s+273.16}e^{\frac{\varphi g}{R(T_s+273.16)}}\tag{2}$$

$$q_{va}=\frac{2.185\times0.6018}{273.16+T_a}\frac{R_H}{100}e^{\frac{17.27T_a}{T_a+237.3}}\tag{3}$$

$$r_t=r_a+r_s+r_m$$

$$r_a=\frac{1}{uK^2}\ln^2\left(\frac{Z}{Z_0}\right)$$

- 式中 E ——土面蒸发量,mm/min
 q_{vs} ——土壤表面空气湿度,kg/m³
 q_{va} ——空气湿度,kg/m³
 r_t ——土壤总蒸发阻力,s/m
 r_a ——空气动力学阻力,s/m
 r_s ——土壤表面蒸发阻力,s/m
 r_m ——秸秆覆盖阻力,s/m
 T_s ——土壤表面温度,℃
 R ——宇宙气体常数,J/(mol·K)
 φ ——土壤表面水势,m
 g ——重力加速度,m/s²
 T_a ——空气温度,℃
 R_H ——空气相对湿度,%
 Z ——测定风速 u 的参考高度,m
 Z_0 ——地表的粗糙度,m
 u ——参考高度的平均风速,m/s
 K ——Karman 常数,取 0.41

r_s 的计算公式见表 2;覆盖条件下 r_m 计算见 2.6 节,若无覆盖,则 $r_m=0$ 。参照翁笃鸣等^[18]研究结果,本文中 CK、S1、S2、S3、S4 粗糙度分别取 0.01、0.013、0.015、0.017、0.019 m。

表 2 土壤表面蒸发阻力计算公式
Tab.2 Soil surface evaporation resistance calculation formula

名称	表达式	文献序号
公式 1	$r_s=\frac{(0.75\theta_{sat}-\theta_v)r_a}{\theta_v}$	[19]
公式 2	$r_s=\frac{2.16\times100(\theta_{sat}-\theta_v)^{10}}{2.29\times10^{-5}\left(\frac{T_s}{273.16}\right)^{1.75}}$	[20]
公式 3	$r_s=3.5\left(\frac{\theta_{sat}}{\theta_v}\right)^{2.3}+33.5$	[10]
公式 4	$r_s=3.8113\times10^4e^{\frac{-13.515\theta_v}{\theta_{sat}}}$	[21]
公式 5	$r_s=-805+4140(\theta_{sat}-\theta_v)$	[20]
公式 6	$r_s=10e^{35.63(0.15-\theta_v)}$	[11]

注:土壤体积含水率 θ_v 通过 $\theta_v=\rho_s\theta_s$ 转换得到, ρ_s 为土壤容重,取 1.3 g/cm³; θ_{sat} 为土壤饱和含水率。

1.4.2 土壤蒸发阻力

参考国内外与土壤表面蒸发阻力相关的公式,当前土壤表面蒸发阻力公式见表 2。

1.4.3 模拟效果评价

以纳什效率系数(NS)、均方根误差(RMSE)、平均相对误差(MAE)评价模拟值与实测值吻合程度,评价模拟效果。NS 越大,RMSE、MAE 越小,模拟效果越好。采用 Excel 和 SPSS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 表层 0~1 cm 土壤含水率随时间的变化

各处理表层 0~1 cm 土壤含水率随时间的变化趋势基本一致,均随时间的延长呈指数型递减趋势(图 2),达到极显著负相关水平($p<0.01$)。除 S3 处理拟合曲线的决定系数 R^2 略低外,其余处理拟合曲线的决定系数 R^2 均高于 0.9。同一时刻,秸秆覆盖量较大的处理,表层土壤含水率较大。从图中还可以看出,CK、S1、S2、S3、S4 最大含水率依次为

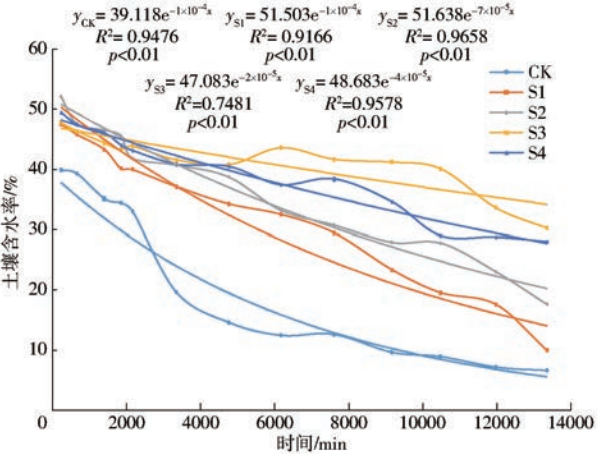


图 2 0~1 cm 土壤含水率随时间的变化曲线
Fig.2 Changing curves of soil moisture of 0~1 cm depth

39.12%、51.50%、51.64%、47.08%、48.68%。

2.2 土壤蒸发强度随土壤含水率的变化

结合 2.1 节分析结果,计算了各处理不同时间实测蒸发强度下对应的土壤含水率,并建立不同处理土壤蒸发强度与含水率的关系(图 3),可见,各处理土壤蒸发强度随土壤含水率的增加呈指数型递增趋势($p < 0.01$),CK、S1、S3 处理拟合曲线决定系数 R^2 分别为 0.897 4、0.806 3、0.723 9;S2 和 S4 处理拟合曲线决定系数相对较低,分别为 0.281 7 和 0.424 7。

2.3 土壤累计蒸发量随含水率的变化

试验期间,各处理土壤累计蒸发量随含水率的

变化均呈极显著($p < 0.01$)负相关关系,累计蒸发量随土壤含水率的降低呈线性递增的趋势(图 4),各处理拟合直线的决定系数均大于 0.9。试验期间,CK、S1、S2、S3、S4 土壤累计蒸发量分别为 17.79、20.30、14.22、14.57、10.27 mm。

2.4 土壤平均含水率、蒸发强度、累计蒸发量随秸秆覆盖量的变化

图 5 反映了试验期间秸秆覆盖量与平均土壤含水率、平均土壤蒸发强度及累计蒸发量的关系。由图可知,平均土壤含水率随秸秆覆盖量的增加呈线性递增趋势,拟合方程为 $y = 10.776x + 26.333$,达极显著水平($R^2 = 0.742\ 3, p < 0.01$) ;

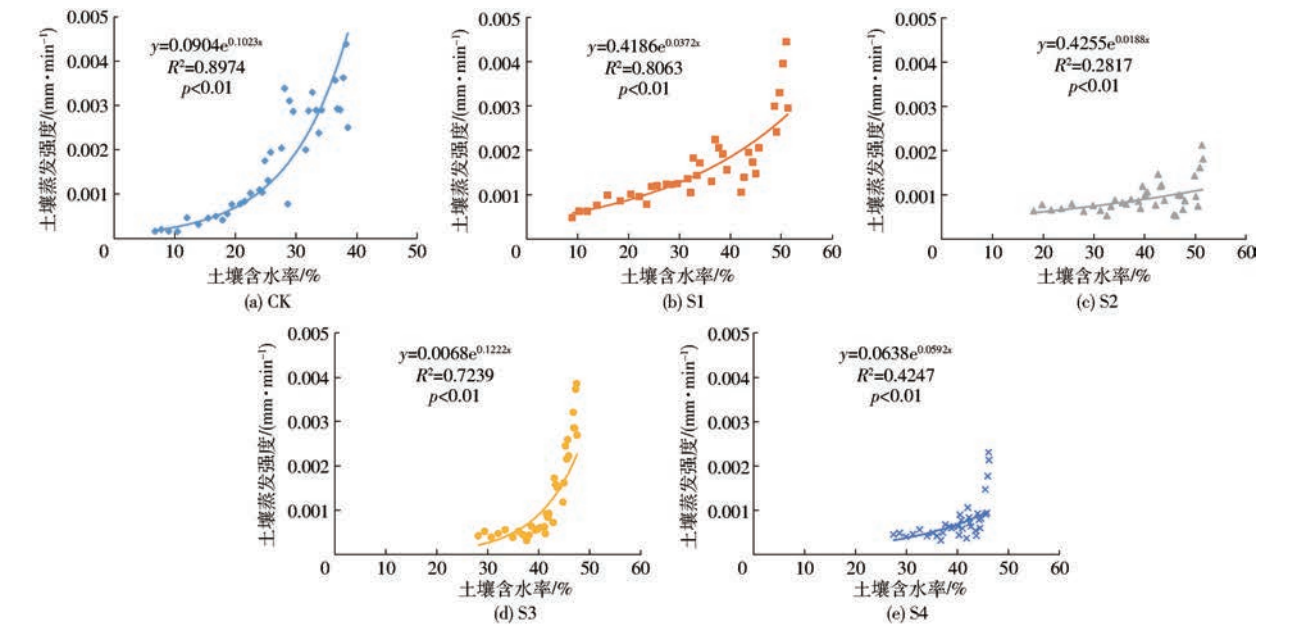


图 3 土壤蒸发强度与表层 0~1 cm 土壤含水率关系

Fig. 3 Relationships between soil evaporation rate and surface moisture of 0~1 cm depth

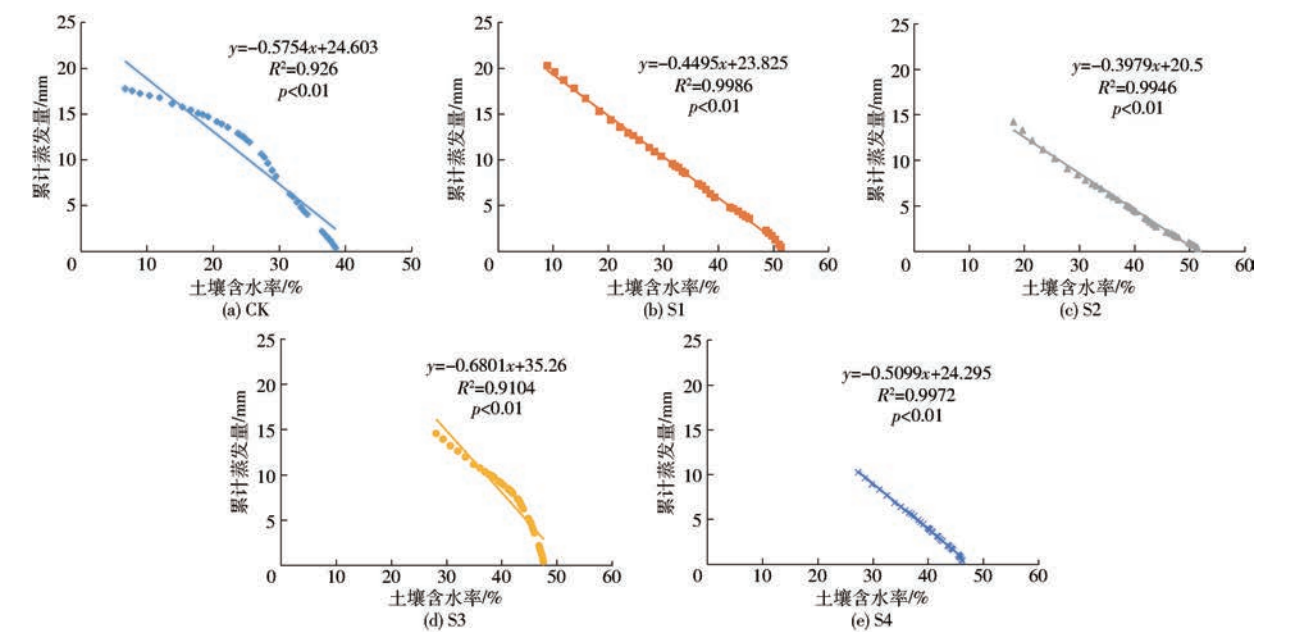


图 4 土壤累计蒸发量与表层 0~1 cm 土壤含水率关系

Fig. 4 Relationships between cumulative soil evaporation and surface moisture of 0~1 cm depth

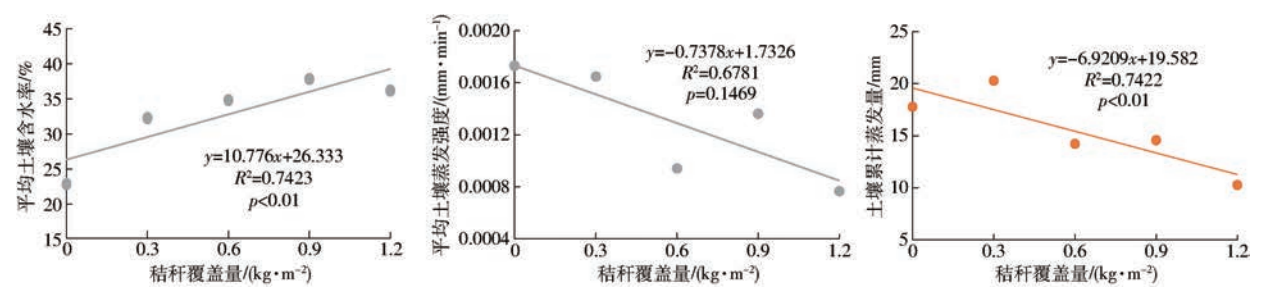


图5 秸秆覆盖量与平均土壤含水率、土壤蒸发强度及累计蒸发量的关系

Fig. 5 Relationships between straw coverage amount and soil moisture, soil evaporation rate and cumulative evaporation

平均土壤蒸发强度随秸秆覆盖量的增加呈线性递减趋势,拟合方程为 $y = -0.7378x + 1.7326$,未达到显著性水平 ($R^2 = 0.6781, p = 0.1469$);土壤累计蒸发量随秸秆覆盖量的增加亦呈线性递减趋势,拟合方程为 $y = -6.9209x + 19.582$,达极显著水平 ($R^2 = 0.7422, p < 0.01$)。

2.5 无覆盖条件下土壤表面蒸发阻力公式确定

利用表2的6个土壤蒸发阻力公式,分别计算了无覆盖模式下土壤蒸发量,并统计分析了不同计算公式下土壤蒸发量计算值与实际值的关系,结果见表3。根据计算蒸发量与实测蒸发量拟合直线的斜率 k 及决定系数 R^2 可知,公式1、3、5、6的计算蒸发结果与实测蒸发结果基本吻合,综合考虑NS系数、RMSE和MAE等指标可知,公式3计算蒸发量与实测蒸发量的NS系数最大,MAE最低,总体模拟效果较好。因此,推荐使用公式3作为无覆盖条件下土壤表面蒸发阻力计算公式。

表3 无覆盖条件下不同土壤表面蒸发阻力公式
计算蒸发量与实测蒸发量结果

Tab.3 Statistics of different soil surface evaporation resistance formulas for calculated evaporation and measured evaporation results under uncovered conditions

土壤表面蒸发阻力公式	k	R^2	RMSE/ (mm·min ⁻¹)	MAE/ (mm·min ⁻¹)	NS
公式1	0.5394	0.31	0.23	0.11	-0.80
公式2	1.3212	-0.75	0.29	0.09	-0.84
公式3	0.8262	0.43	0.33	0.06	0.28
公式4	0.0490	-2.86	0.85	0.29	-63.11
公式5	0.5782	0.46	0.43	0.10	-0.43
公式6	0.7324	0.55	0.46	0.07	0.14

2.6 秸秆覆盖条件下覆盖阻力计算

结合空气动力学理论,秸秆覆盖条件下秸秆覆盖阻力公式为 $r_m = \frac{q_{vs} - q_{va}}{E} - r_a - r_s$ 。利用2.5节确定的土壤蒸发阻力公式3及实测数据可求得不同覆盖量下秸秆覆盖阻力(图6)。结果表明,同一秸秆覆盖量下秸秆覆盖阻力随时间的延长呈先上升后降低的趋势,试验期间S1、S2、S3、S4处理平均秸秆覆

盖阻力分别为178.45、385.19、402.19、543.25 s/m(图6)。由图6还可以看出,就同一处理而言,空气动力学阻力基本恒定,土壤表面蒸发阻力随着时间的延长呈指数型递增趋势,蒸发前期秸秆覆盖阻力显著高于空气动力学阻力和土壤表面蒸发阻力,而蒸发后期秸秆覆盖阻力略有下降,土壤表面蒸发阻力持续增加,说明蒸发后期秸秆覆盖阻力对土壤蒸发的抑制作用降低。将计算的平均秸秆覆盖阻力与相应的秸秆覆盖量耦合可知(图7),秸秆覆盖阻力随秸秆覆盖量的增加而线性增加,两者呈显著正相关 ($R^2 = 0.9114, p < 0.05$)。

2.7 秸秆覆盖条件下计算土壤蒸发量与实测土壤蒸发量对比

图8为秸秆覆盖条件下计算土壤蒸发量与实测土壤蒸发量,计算土壤蒸发量与实测土壤蒸发量的RMSE为 4.18×10^{-4} mm/min、MAE为 3.85×10^{-5} mm/min、NS为0.90,拟合直线斜率 k 为0.926,接近1,计算的土壤蒸发量与实际测量的土壤蒸发量数值相接近,表明所建立的秸秆覆盖阻力计算公式可用于秸秆覆盖条件下土壤蒸发量的计算。

3 讨论

土壤水分蒸发即土壤水由液态转变为气态脱离土体的过程,通常可由蒸发强度表示,其结果是降低土壤含水率;土壤蒸发同时受土壤自身及外部环境共同作用^[1,22]。本研究中,表层土壤含水率随时间的延长而显著呈指数型递减趋势,结果与高鹏等^[23]研究一致;秸秆覆盖处理(S1~S4)表层初始含水率显著高于对照处理(CK),原因可能是加水后各处理静置24 h,静置蒸发过程中水汽在覆盖的秸秆层内凝结,经取土扰动重新回落至地表所致;此外,取土过程中虽已去除表层秸秆,但土壤中仍残留少量秸秆叶片,残留叶片含水率较高亦是引起表层土壤含水率高的原因之一。一般而言,土壤蒸发可分为稳定蒸发和蒸发强度递减两个阶段。其中,稳定蒸发阶段土壤含水率相

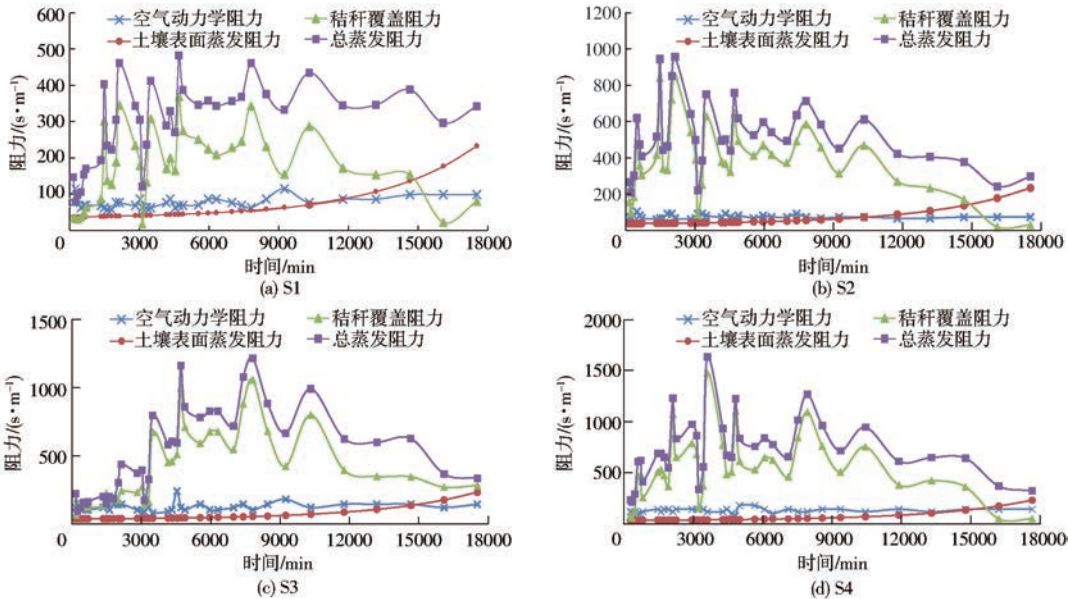


图 6 不同处理蒸发阻力随时间的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of evaporation resistance during experimental time for different treatments

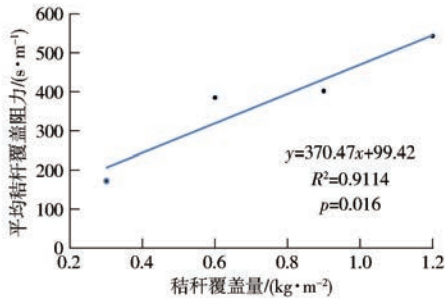


图 7 平均秸秆覆盖阻力与秸秆覆盖量的关系

Fig. 7 Relationship between average coverage resistance and straw amount

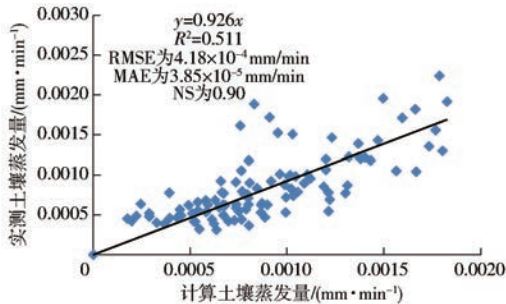


图 8 秸秆覆盖条件下计算土壤蒸发量与实测土壤蒸发量的关系

Fig. 8 Relationship between calculated soil surface evaporation and measured soil surface evaporation under straw coverage

对较高,土壤蒸发强度主要受环境因素影响;蒸发强度递减阶段土壤蒸发强度主要受土壤供水能力(自身含水率)影响^[1,8,23]。本研究中,试验开始前,为了使各处理土壤水分分布一致,所有样品静置了 24 h,试验开始后土壤蒸发强度随着表层土壤含水率的降低而呈指数型减小,结果与高鹏程等^[23]研究结果基本一致。由图 3 可以看出,S2 和

S4 处理土壤蒸发强度整体均低于其余各处理,原因可能是试验过程中 S2 和 S4 处理所处位置风速较小,不利于蒸发。此外,从图 3 还可以看出,秸秆覆盖处理(S1 ~ S4)的蒸发强度在最大表层土壤含水率附近时变化幅度较大,与土壤含水率无明显关系,其原因可能与此阶段土壤含水率相对较高,土壤蒸发主要受环境因素影响有关。秸秆覆盖具有较好的保水、抑蒸效果^[16,23],本研究表明,秸秆覆盖量较大的处理,表层土壤含水率较大,蒸发强度和累计蒸发量则随秸秆覆盖量的增加呈线性降低趋势,这与孙博等^[24]研究一致。

蒸发阻力是反映土壤水汽由蒸发面向大气传输难易程度的重要指标,主要与土壤内部水汽含量、温度及蒸发层内水汽传导性能等因素有关^[10-14]。本试验在室内完成,各处理的空气温湿度及风速等变化幅度较小,故计算的空气动力学阻力相对恒定;土壤表面蒸发阻力的确定建立在能量平衡和水量平衡的基础上,但因其涉及因素众多,且参数难以确定,因此多以经验公式估算^[10-11,19-21]。本研究表明公

式 $r_s = 3.5 \left(\frac{\theta_{sat}}{\theta} \right)^{2.3} + 33.5$ 计算的蒸发量与实测蒸发量模拟效果较好,即该式较符合本试验情况,这与 SHU^[10]和李艳等^[16]研究一致。在此基础上,通过计算发现,秸秆覆盖阻力随覆盖量的增加呈线性递增趋势,原因是秸秆覆盖量增加后覆盖层厚度增大,土壤水向大气的传输路径增加、阻滞作用增强^[4];此外,因秸秆覆盖引起的土壤热量变化也是影响水汽传输阻力(覆盖阻力)波动的重要原因^[5,25]。秸秆覆盖条件下,秸秆覆盖阻力随时间的延长呈先升后降的变化趋势,其原因可能是土壤含水率降低,水

汽传输速率减小以及外界环境因素变化共同作用所致^[15-16]。本研究中模拟的土壤蒸发量略低于实测蒸发量,其原因可能是模拟过程中假定水分以毛管水形式运移,而实际土壤水运移过程中则是毛管水、膜状水以及气态水3种形式运移^[26-27];此外,本试验各处理所用的蒸发装置尺寸较小,蒸发过程中的“边际效应”可能是引起实测蒸发量较模拟蒸发量大的原因之一^[28]。

本文试验是在室内完成的,试验期间土壤含水率相对较高,模拟的蒸发也是在含水率相对较高的结果,有关低土壤含水率条件下的秸秆覆盖阻力以及土壤盐分对蒸发的影响还有待于进一步研究。此外,由于试验仪器材料、规格及环境等因素限制,本文测定结果与模拟结果有一定差异,但秸秆覆盖阻力推算方法及思路可为土壤蒸发模拟和预测研究提供参考。

4 结束语

秸秆覆盖量较大的处理表层土壤含水率较大,且表层土壤含水率随时间呈极显著($p < 0.01$)指数型递减趋势;秸秆覆盖抑制了土壤蒸发强度,并降低了土壤累计蒸发量。随着含水率的降低,土壤蒸发强度呈极显著($p < 0.01$)指数型降低趋势,土壤累计蒸发量呈极显著($p < 0.01$)线性递增趋势。结合试验结果,本研究推荐使用表2中的公式3作为无覆盖条件下土壤表面蒸发阻力计算公式,以此公式为基础得出,秸秆覆盖阻力随秸秆覆盖量的增加而增加,且同一秸秆覆盖量条件下,秸秆覆盖阻力基本不变。以水汽扩散理论为基础,结合土壤表面蒸发阻力和秸秆覆盖阻力计算的土壤蒸发强度与实测蒸发强度结果相一致,本研究建立的秸秆覆盖阻力模型可用于土壤蒸发强度的模拟和预测。

参 考 文 献

[1] OR D, LEHMANN P, SHAHRAEENI E, et al. Advances in soil evaporation physics-a review [J]. Vadose Zone Journal, 2013, 12(4): 1-16.

[2] 刘佩贵,夏艳,尚熲廷. 不同质地裸土潜水蒸发估算方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1):148-153.
LIU Peigui, XIA Yan, SHANG Yiting. Estimation methods of phreatic evaporation for different textures in bare soil area [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 148-153. (in Chinese)

[3] 赵聚宝,张天佑. 秸秆覆盖对旱地作物水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 1996, 29(2):59-66.
ZHAO Jubao, ZHANG Tianyou. Effect of straw mulching on water use efficiency of crops in dryland [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1996, 29(2): 59-66. (in Chinese)

[4] 仲昭易,张瑜,冯绍元,等. 秸秆深埋结合地膜覆盖土壤水盐运移模拟试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(6):25-30.
ZHONG Zhaoyi, ZHANG Yu, FENG Shaoyuan, et al. Incorporating straw coupled with film mulching to ameliorate soil salinization [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019,38(6): 25-30. (in Chinese)

[5] 付强,马梓昇,李天霄,等. 覆盖物对冻融土壤热量空间分布与传递效率的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 292-298.
FU Qiang, MA Ziao, LI Tianxiao, et al. Influence of different covers on heat spatial distribution and transfer efficiency of freezing-thawing soil [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(2): 292-298. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180237&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.037. (in Chinese)

[6] 赵鸿雁,吴钦孝,刘向东,等. 森林枯枝落叶层抑制土壤蒸发的研究[J]. 西北林学院学报, 1992, 7(2):14-20.
ZHAO Hongyan, WU Qinxiao, LIU Xiangdong, et al. Study on the suppression of soil evaporation by forest litter layer [J]. Journal of Northwest Forestry University, 1992, 7(2): 14-20. (in Chinese)

[7] 赵鸿雁,刘向东,吴钦孝. 枯枝落叶覆盖下的土壤蒸发的数学模型[J]. 水土保持通报, 1992, 12(2):61-64.
ZHAO Hongyan, LIU Xiangdong, WU Qinxiao. Mathematical model of soil evaporation under litter cover [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1992, 12(2): 61-64. (in Chinese)

[8] 孙景生,康绍忠. 沟灌夏玉米棵间土壤蒸发规律研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(5):399-401.
SUN Jingsheng, KANG Shaozhong. Research on soil evaporation law of furrow irrigation summer maize [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2004, 35(5): 399-401. (in Chinese)

[9] 郑鑫,李波,衣淑娟. 盐碱土裸土蒸发 Ritchie 模型修正及验证[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23):131-136.
ZHENG Xin, LI Bo, YI Shujuan. Ritchie model correction and verification of bare soil evaporation in saline-alkali soil [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(23): 131-136. (in Chinese)

[10] SHU F S. Moisture and heat transport in a soil layer forced by atmosphere conditions [D]. Mansfield: University of Connecticut, 1982: 1-25.

[11] CAMILLO P J, GURNEY R J. A resistance parameter for bare soil evaporation models [J]. Soil Science, 1986, 141(2): 95-105.

[12] PETER L, OLIVIER M, PIERRE G, et al. Soil texture effects on surface resistance to bare-soil evaporation [J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(19): 10398-10405.

- [13] 李毅,任鑫. 覆膜开孔条件下斥水性层状土壤蒸发实验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(11):58–64.
LI Yi, REN Xin. Evaporation experiments on layered water-repellent soil under perforated plastic mulch[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 58–64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121112&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.012. (in Chinese)
- [14] ZHANG C, LI L, LOCKINGTON D. A physically based surface resistance model for evaporation from bare soils [J]. Water Resources, 2015, 51(2): 1084–1111.
- [15] QIU Y, XIE Z K, WANG Y J, et al. Influence of gravel mulch stratum thickness and gravel grain size on evaporation resistance [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1908–1913.
- [16] 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. Soil evaporation resistance and evaporation simulation under wheat straw mulching conditions [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 98–106. (in Chinese)
- [17] YAMANAKA T, INOUE M, KAIHOTSU I. Effects of gravel mulch on water vapor transfer above and below the soil surface [J]. Agricultural Water Management, 2004, 67(2): 145–155.
- [18] 翁笃鸣,陈万隆,沈觉成. 小气候与农田小气候[M]. 北京:中国农业出版社,1981.
- [19] DEARDORFF J W. Efficient prediction of ground temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation [J]. Geophysical Journal International, 1978, 83(C4): 1889–1903.
- [20] KONDO J, SAIGUSA N, SATO T. A parameterization of evaporation from bare soil surfaces [J]. Journal of Applied Meteorology, 1990. 29(5): 385–389.
- [21] NOVAK M D. Dynamics of the near-surface evaporation zone and corresponding effects on the surface energy balance of a drying bare soil [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(10): 1358–1365.
- [22] SHOKRI N, OR D. What determines drying rates at the onset of diffusion controlled stage-2 evaporation from porous media [J]. Water Resources Research, 2011, 47(9): 1–8.
- [23] 高鹏程,张国云,孙平阳,等. 秸秆覆盖条件下土壤水分蒸发的动力学模型[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(10):55–58.
GAO Pengcheng, ZHANG Guoyun, SUN Pingyang, et al. Dynamic model of soil water evaporation under straw mulching conditions [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2004, 32(10): 55–58. (in Chinese)
- [24] 孙博,解建仓,汪妮,等. 秸秆覆盖对盐渍化土壤水盐动态的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4):180–184.
SUN Bo, XIE Jiancang, WANG Ni, et al. Effects of straw mulching on water and salt dynamics in saline soil [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(4): 180–184. (in Chinese)
- [25] 李全起,陈雨海,于舜章,等. 灌溉与秸秆覆盖条件下冬小麦农田小气候特征[J]. 作物学报, 2006, 1(2):306–309.
LI Quanqi, CHEN Yuhai, YU Shunzhang, et al. Microclimatic characteristics of winter wheat farmland under irrigation and straw mulching conditions [J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 1(2): 306–309. (in Chinese)
- [26] PETERS A. Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range [J]. Water Resources Research, 2013, 49(10): 6765–6780.
- [27] WANG W, ZHANG Z, YE H T C J, et al. Flow dynamics in vadose zones with and without vegetation in an arid region [J]. Advances in Water Resources, 2017, 106: 68–79.
- [28] 杨宪龙,魏孝荣,邵明安. 不同规格微型蒸渗仪测定土壤蒸发的试验研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(2):343–350.
YANG Xianlong, WEI Xiaorong, SHAO Ming'an. Effect of different kinds of micro-lysimeters on soil evaporation measurement [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(2): 343–350. (in Chinese)