

引用格式:

罗皓峰, 杨启良. 松针覆盖土壤的水分动态及其 HYDRUS 模拟[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(6): 692–699.

LUO H F, YANG Q L. Soil moisture dynamics under pine needle mulch and its HYDRUS simulation[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(6): 692–699.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



松针覆盖土壤的水分动态及其 HYDRUS 模拟

罗皓峰, 杨启良*

(昆明理工大学农业与食品学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 为准确还原松针覆盖条件下的土壤水分动态变化规律, 设置 0.29、0.58、0.87 g/cm² 共 3 个不同的松针覆盖水平(分别记为 F₁、F₂、F₃)和不覆盖松针处理(F₀)进行一维土柱垂直入渗试验, 以 van Genuchten 模型为基础, 针对松针覆盖层的特性设置相应的水力特征参数, 并使用 HYDRUS-1D 对土柱入渗和蒸发过程进行模拟。结果表明: 与 F₀ 相比, 松针覆盖处理 F₁、F₂、F₃ 的土壤蒸发量随松针覆盖层厚度增加而逐渐减少, 松针覆盖处理能明显降低土壤蒸发量; 松针覆盖土壤会优先蒸发松针覆盖层内部的水分, F₃ 在 0~300 min 时段内始终保持着 3 种覆盖处理中最高的时段蒸发量和累计蒸发量, 且时段蒸发量呈现出随时间逐渐减小的趋势; 4 种处理的土壤含水量空间分布主要在 5 cm 以上的浅层土壤中表现出较大的区别, 试验截止时, F₁、F₂、F₃ 在该深度下的地表土壤含水量较 F₀ 提升比例分别为 67.3%、94.9%、110.2%; 7.5~17.5 cm 深度下, F₁、F₂、F₃ 的土壤含水量相比 F₀ 的均有提升, 但相互之间差距不明显; 4 种处理在 20 cm 以下的深层土壤含水量虽然较为接近, 但湿润锋深度随覆盖量增长呈现逐渐增加的趋势; HYDRUS-1D 模型的模拟值同实测值间的均方根误差低于 0.025, 相关系数高于 0.6, 拟合程度较好。

关键词: 松针覆盖; 土壤水分动态; 土壤蒸发量; 土壤含水量; van Genuchten 模型参数; HYDRUS 模拟

中图分类号: S152.7⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2021)06-0692-08

Soil moisture dynamics under pine needle mulch and its HYDRUS simulation

LUO Haofeng, YANG Qiliang*

(College of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: In order to accurately reappear the dynamic changes of soil moisture covered by pine needle, one-dimensional soil column vertical infiltration experiments were performed with 3 different pine needle coverage levels(0.29, 0.58, 0.87 g/cm² denoted as F₁, F₂, F₃) and 1 bare soil control group(F₀). The simulation of the infiltration process was based on the van Genuchten model, and the corresponding hydraulic characteristic parameters of the model were set according to the characteristics of the pine needle layers, and the infiltration and evaporation process of the soil column was simulated using HYDRUS-1D software. The experimental results showed that compared with F₀, the soil evaporation of pine needle mulch treatments F₁, F₂ and F₃ decreased with the increase of the thickness of the pine needle mulch. The pine needle mulch treatments showed a strong inhibitory effect on the reduction of soil moisture. The water inside the pine needle mulch was preferentially evaporated, therefore F₃ maintained the highest period evaporation and cumulative evaporation of the 3 coverage treatments and the period evaporation showed a trend of gradually decreasing over time in the period of

收稿日期: 2020-04-17

修回日期: 2020-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779133)

作者简介: 罗皓峰(1995—), 男, 云南昆明人, 硕士研究生, 主要从事土壤水分动态及其数值模拟研究, haofengwork@126.com; *通信作者, 杨启良, 男, 博士, 教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, 284186040@qq.com

0-300 min. The spatial distribution of soil water contents were mainly different in the shallow soil above 5 cm. At the end of the experiment, as compared with F_0 , the soil surface water contents of F_1 , F_2 and F_3 increased by 67.3%, 94.9% and 110.2%, respectively. At a depth from 7.5 to 17.5 cm, compared with F_0 , the soil water contents of F_1 , F_2 and F_3 were higher, but the difference among them were not significant. Although the soil water contents were similar for the four treatments under 20 cm, the depth of the wetting front showed a gradual increase over the coverage increase. The root mean squared errors between the simulated values of the HYDRUS-1D model and the measured values were lower than 0.025, and their correlation coefficients were higher than 0.6, which indicated the simulation fitted well.

Keywords: pine needle mulch; soil moisture dynamics; soil evaporation; soil water content; van Genuchten model parameters; HYDRUS simulation

松针覆盖处理是中药材种植中常用的一种土壤保湿方式,与塑料薄膜覆盖等手段相比,松针覆盖层能为土壤提供良好的保温和透气效果,缓解天然降雨和灌溉对土壤表面的打击能力,增加土壤入渗能力,减少土壤表面的蒸发损失,具有很好的保水、保肥效果^[1-3]。松针覆盖处理还能提高土壤的有机质含量,增强微生物活性^[4-5]。此外,松针覆盖处理能显著减少坡地土壤的侵蚀量和径流量^[6],具有保持坡地水土的作用。目前,针对松针覆盖层的研究主要聚焦于松针覆盖对树木、药材育苗效果等的对比试验,较少有人关注松针覆盖层作为土壤覆盖物的保墒性能、作用机理等,松针覆盖层的施用方法也仅仅停留在经验层面。此外,现有的土壤水分模型不能够完全模拟松针覆盖层对土壤的影响。

MOURA 等^[7]在热带气象条件下研究了豆科秸秆覆盖对土壤蒸发通量和玉米氮素吸收的影响,发现覆盖处理降低了土壤渗透阻力,并且提高了玉米抽穗期的氮素吸收率。李艳等^[8]提出了留茬覆盖模式下的蒸发阻力和土面蒸发模型,并基于试验数据确定了公式参数,结果表明,当秸秆覆盖量小于 0.05 g/cm^2 时,覆盖层的蒸发阻力随秸秆覆盖量的增加而呈指数增长。但以上研究都没有考虑水分在覆盖层内部的运动。实际上,当水分通过覆盖层时,部分水量会截留在覆盖层内部,对松针覆盖层而言,截留在覆盖层内部的水分质量可达覆盖层总质量的 60%。KADER 等^[9]利用 HYDRUS-1D 模型,通过设置秸秆覆盖层的水力参数和热参数模拟了稻草覆盖和裸土处理在日本中部岐阜县的雨养大豆栽培中的水热运移,证明了 HYDRUS 模型能够用于秸秆等有机覆盖条件下土壤层和覆盖层内部的水分动态模拟。

秸秆覆盖物是一种典型的有机覆盖物,松针覆盖层和秸秆覆盖层具有相似的物理结构和物质构

成,松针覆盖对土壤产生影响的研究可参考秸秆覆盖的研究。本研究中,结合室内模拟试验和 HYDRUS-1D 软件模拟,探索松针覆盖条件下影响土壤蒸发量和土壤含水量的因素,并结合实际情况率定松针覆盖层在 van Genuchten - Mualem 模型下的水力参数,从而研究不同松针覆盖量条件下的土壤在单次降水下的土壤水分动态,旨在为实现松针覆盖农田的土壤水分动态的准确模拟和实时预测提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验用土样按土壤质地国际标准分类为壤质黏土,风干后用 2 mm 孔径的筛子过筛,测量其残余含水量为 7.87%。填入有机玻璃管后击实,其干密度为 1.202 g/cm^3 。利用吸管法测得其土壤物理性质(表 1)。

表 1 试验用土壤的物理性质

砂粒 占比/%	粉粒 占比/%	黏粒 占比/%	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	饱和 含水量/%
38.16	35.53	26.31	1.20	2.67	47.30

松针覆盖层选用自然风干的云南松松针制备,通过 20 次随机抽样测得松针的平均长度为 13.22 cm。将松针均匀散落在筛子中,当筛子中的松针厚度达到比预定的厚度稍厚的程度后,使用平底的镇子镇压几次,压实厚度约为原厚度的 30%;随后使用水管均匀浇水直至筛子中的松针湿透,沥干水分后在通风处晾晒 5 d,使覆盖层彻底风干。此方法制得的松针覆盖层在物理性质上与田间取样获得的松针覆盖层较为接近^[10]。用烘干法测得其残余含水量为 0.271%,干物质密度为 0.617 g/cm^3 。

1.2 试验装置设计

模拟松针覆盖条件下的一维土柱垂直入渗的试验装置如图1所示。垂直土柱的制作采用内径81 mm,管长750 mm的有机玻璃土柱管,底部设有网格,方便管内土壤中的空气和水分排出。网格上方铺有一层滤纸,以防止试验土样流失。管壁一侧每隔50 mm设有一个取样孔,最底部的取样孔距离有机玻璃管底部网格的距离为25 mm。将有机玻璃管从底部开始每隔50 mm划分为一层,以控制有机玻璃管内的土壤干密度。土壤填充高度为500 mm,高于该高度的取样孔用塑料薄膜封死,以容纳覆盖层并防止灌水时产生的积水外流。每根土柱上方均悬挂有一盏200 W白炽灯,为土柱上表面提供稳定的热能。为了使土壤表面所受的热辐射量与太阳常数相等^[11],将灯丝与土柱顶端表面的距离设置为10.06 cm。

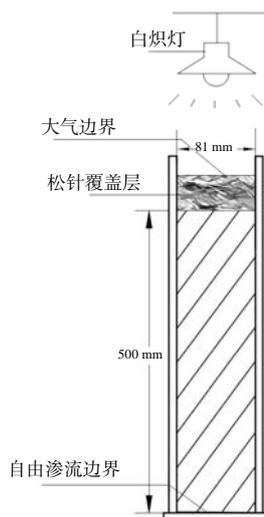


图1 模拟松针覆盖条件下的一维土柱垂直入渗试验装置

Fig.1 One-dimensional soil column vertical infiltration simulated experiment device under pine needle mulch

1.3 试验设计

室内试验于2019年11月在昆明理工大学农业与食品学院实验室内进行。为模拟不同覆盖程度下一维土柱垂直入渗的过程,设置3种松针覆盖量处理,分别为0.29, 0.58, 0.87 g/cm²,记为F₁、F₂、F₃;同时设置空白(裸土)对照组(F₀),共4组模拟试验。试验装置均置于实验室内遮阴避风处,避免日光照射和风的影响。

试验开始时,使用喷壶以恒定的速率均匀喷入

200 mL蒸馏水,随后打开白炽灯。试验共持续96 h,0~12 h(前期),每隔1 h将土柱整体放置于最小量程0.5 g的台秤上称质量并记录;>12~48 h,每隔2 h称质量并记录;>48~96 h,每隔4 h称质量并记录。考虑到试验全程无底部渗水,每次称质量测得的质量差值即为该时段内蒸发的水的质量。

试验开始后,每隔24 h从土柱侧面设置的取样孔取得土柱不同深度的土壤样本,以监测土柱不同深度下的含水量变化。考虑到取样会对取样点附近的土壤性质产生影响,每次取样的土壤均采集自土柱内结构较为完整的部分,且每次取样的土壤控制在5~10 g。取出的土样用烘箱在105℃下历经12 h烘干,以准确测量土样的含水量。每次取样前后称土柱质量,以消除取样对质量平衡计算的影响。

为求解松针覆盖层的水力特征参数,还需要对覆盖层水分特性进行测试:使用4个大孔不锈钢土筛,高度10 cm,内部填满风干的松针覆盖层,用台秤称质量后将土筛堆叠组合为1个40 cm高的松针柱,松针柱顶部与大气接触,侧面被土筛的框阻挡而与大气隔绝,底部允许水分自由渗出;使用水管浇透松针柱,使其含水量达到饱和,分别称量每个土筛的质量,即可计算出每个土筛内松针的平均含水量;随后将松针柱放入容器中,让松针柱自由蒸发/渗流10 h,每隔1 h计算其蒸发量、渗流量和每个土筛的质量,并推算出土筛内松针的平均含水量,假定土筛内部松针的中心点的含水量等于平均含水量,即可得到松针柱内部的含水量变化序列。

2 模型的建立

2.1 基本假定

松针覆盖处理对土壤的影响需要综合考虑土壤的结构性状、松针覆盖层的热能传递特性、覆盖层对土壤表层大气条件的影响等多种因素,针对松针覆盖土壤水分运动的数值模拟十分复杂,必须对试验的影响因素进行一定的简化:①将松针覆盖层视为具有稳定性状的均匀多孔导水介质,覆盖层中的水分运动以垂向运动为主,故松针覆盖条件下的土壤水分运动可作为垂向一维流问题进行模拟;②忽略土壤温度变化对土壤水分运动的影响。

2.2 计算模型

运用 HYDRUS-1D(4.16.0110)进行土壤水的入渗和蒸发模拟。松针覆盖层中的含水量及蒸发量同样纳入计算范围,以模拟松针覆盖处理对土壤水动态的影响。非饱和条件下的土壤的水力函数用 van Genuchten-Mualem 模型进行计算,具体公式参见 HYDRUS-1D 软件说明。

2.3 边界条件与参数的率定

2.3.1 初始条件与边界条件的确定

根据试验情况设置一维蒸发入渗模型的边界条件。上边界条件设置为表层大气边界条件,允许水积聚在表面上,地表水层高度受沉积、渗透和蒸发的影响而变化。土壤表面的最大水头高度设置为 10 cm。下边界条件设置为自由渗流条件,允许土壤自由水通过下边界。土壤和覆盖层的初始含水量均由试验测量获得;潜在蒸发量则由相同条件下的水面时段蒸发量推求。

2.3.2 参数率定

土壤水力参数的确定:首先运用软件内置的 Rosetta 工具,采用土壤颗粒组成和容重参数计算模型的土壤水力参数,并结合模拟结果对参数进行微调,最终根据精度较高的结果确定试验土壤的水分特征参数。

参考 KADER 等^[9]的方法确定土壤表面的松针覆盖层水力参数:根据剖面的大小划分为多个计算域,用土筛法测得的松针含水量变化序列作为 HYDRUS 的反解数据,利用 HYDRUS 的反解功能计算松针对应的 van Genuchten-Mualem(VG)模型参数。饱和含水量(θ_s)和残余含水量(θ_r)的值根据烘干法测得的实测数据设置。VG 模型中参数 α 的大小与土壤含水量($\theta(h)$), h 为压力水头)大小呈负相关,

其他参数不变时, α 越大,水分特征曲线的中间部分对应的负压值越小。从物理含义来说, α 越大,等含水量下的负压水头越低,介质持水能力越弱^[12-13]。设定覆盖层参数 α 的取值区间为 0.05~0.30。

参数 n 的变化会影响到 $\theta(h)$ 和土壤导水率的值。根据霍思远等^[14]的研究,参数 n 的变化会对水分特征曲线中含水量较高的部分产生较为明显的影响。当 n 值增大时,水分特征曲线中含水量较高的部分负压值减小,且曲线拐点处的导数绝对值增大,曲线变得更加曲折, n 值减少时,曲线高含水量部分负压值增大,曲线变得更加平滑。根据松针覆盖层的性质,设定初始参数时 n 值同样高于土壤层相关参数。同时,敏感性分析表明, n 的变化对入渗和蒸发的影响都较为剧烈,故 n 的取值过大,将极易导致模型无法拟合,因此,反向求解中设置 n 的取值区间为 1.5~2.1。

根据陈卫金等^[15]的研究结果, VG 模型中参数 α 和 n 的大小还与水分特征曲线拐点处的负压(p_i)相关联,更大的 n 值会使 p_i 更趋近于 α 的倒数,而较高导水率和较低持水能力的介质符合这些条件。

参数 K_s 为饱和导水率。由于松针覆盖层质地疏松,饱和导水率相比土壤更高,故 K_s 取值较大。

参数 l 的取值与介质的孔隙连通性相关,其值可正可负。 l 的大小与 $K(h)$ 呈负相关。 l 的值越小,介质中的孔隙连通性就越高,介质在非饱和条件下的导水率就越高^[16]。在对土壤类介质的计算中, l 的值通常取 0.5,但由于覆盖层的水力特性与土壤不同,其内部几乎没有毛细管效应,且含水量不受土壤补给影响,因此,将参数 l 的值设置为-0.5。

反解获得的土壤水力参数和覆盖物水力参数列于表 2。

表 2 van Genuchten-Mualem 模型参数

Table 2 Parameters of van Genuchten-Mualem model

材料	θ_r	θ_s	α/cm^{-1}	n	$K_s/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	l
松针覆盖层	0.004 39	0.969	0.226 0	1.98	500.000 0	-0.5
土壤	0.078 70	0.473	0.009 9	1.51	0.020 4	0.5

2.4 模拟结果的评估

使用均方根误差和相关系数评估每种处理的

土壤水分模拟值和实测值之间的相关程度。

3 结果与分析

3.1 松针覆盖处理对土壤蒸发量的影响

由图2可知,与无覆盖土壤相比,松针覆盖土壤的累计蒸发量随覆盖层厚度增加而减少,这表明松针覆盖处理能降低土壤蒸发量,促进土壤保墒。随覆盖量的增加,覆盖层对土壤蒸发的减弱能力的增长速度逐渐放缓,这可能是由于到达土壤表层的热辐射随覆盖厚度的增加呈指数形式递减造成的。

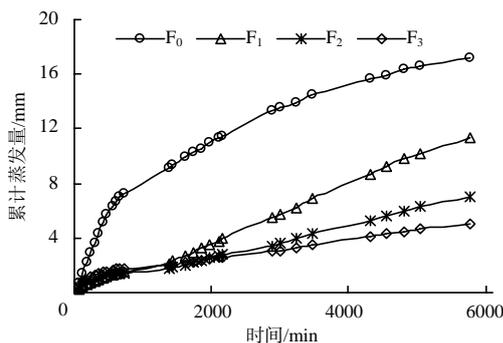


图2 松针覆盖处理后土壤累计蒸发量与时间的关系曲线

Fig.2 Relationship curve between cumulative soil evaporation and time after pine needle mulching treatment

从表3可以看出, F_0 由于没有覆盖处理,在420 min之前均保持了较高的时段蒸发量,平均时段蒸发量为0.729 mm/h。可见,420 min之前的时段内 F_0 的土壤蒸发较为稳定,处于第一蒸发阶段;随后土壤开始进入第二蒸发阶段,时段蒸发量开始下降,截至720 min,水分蒸发的速度已经降至0.252 mm/h。 F_1 在60 min内的时段蒸发量仅为0.272 mm,之后随时间缓慢下降,截至720 min, F_1 的时段蒸发量已经下降至0.078 mm。 F_2 和 F_3 在60 min内的

时段蒸发量均为0.485 mm;在>60~120 min, F_2 的时段蒸发量降低至0.194 mm,低于 F_1 的。 F_3 在0~300 min时段内始终保持着3种覆盖处理中最高的时段蒸发量和累计蒸发量,时段蒸发量也同样呈现出随时间逐渐减小的趋势;但 F_3 的时段蒸发量从>300~360 min开始低于 F_1 的,且>360~420、>420~480、>600~660 min 3个时段低于 F_2 的,得益于360 min前较高的时段蒸发量, F_3 在整个蒸发前期均保持了3组覆盖处理组中最高的累计蒸发量。

表3 松针覆盖处理后12 h土壤的时段蒸发量

Table 3 Interval soil evaporation in 12 hours after pine needle

时段/min	时段蒸发量/mm			
	F_0	F_1	F_2	F_3
0~60	0.660	0.272	0.485	0.485
>60~120	0.699	0.213	0.194	0.310
>120~180	0.815	0.136	0.116	0.194
>180~240	0.757	0.116	0.078	0.155
>240~300	0.737	0.097	0.097	0.136
>300~360	0.718	0.136	0.097	0.116
>360~420	0.718	0.116	0.116	0.097
>420~480	0.640	0.078	0.078	0.058
>480~540	0.582	0.097	0.058	0.097
>540~600	0.388	0.097	0.058	0.078
>600~660	0.291	0.078	0.039	0.019
>660~720	0.252	0.078	0.039	0.039

3.2 松针覆盖处理对土壤含水量时空分布的影响

试验实测和模型模拟的不同时间土壤含水量的空间分布如表4所示。试验中,含水量发生明显变化的土壤层主要位于0~30 cm深度,此处主要分析该深度范围内的实测土壤含水量的变化规律。

表4 松针覆盖处理后不同时间土壤含水量的空间分布

Table 4 Spatial distribution of soil water contents at different times after pine needle mulching treatment

时间/h	深度/cm	土壤含水量实测值				土壤含水量模拟值				%
		F_0	F_1	F_2	F_3	F_0	F_1	F_2	F_3	
24	0.0	11.0	25.1	26.7	26.7	8.2	25.0	26.4	26.7	%
	2.5	18.9	25.7	30.1	27.1	19.4	25.4	26.6	26.7	
	7.5	20.7	26.0	27.6	25.3	22.8	25.7	26.4	26.6	
	12.5	21.2	27.0	24.9	25.6	23.1	25.0	25.6	25.6	
	17.5	19.7	23.9	22.0	23.8	21.6	23.2	23.6	23.5	
	22.5	14.2	16.7	15.6	18.7	16.3	18.5	18.5	18.1	
	27.5	8.6	9.3	12.2	5.5	9.0	9.0	9.0	9.0	
	32.5	8.5	7.1	7.5	12.9	9.0	9.0	9.0	9.0	
	37.5	8.4	7.0	6.2	5.3	9.0	9.0	9.0	9.0	
	42.5	7.7	6.6	6.5	6.8	9.0	9.0	9.0	9.0	
47.5	7.1	6.1	6.3	5.9	9.0	9.0	9.0	9.0		
72	0.0	9.6	15.8	21.1	19.6	8.2	17.7	20.5	22.1	%
	2.5	13.9	20.0	24.9	22.1	16.1	19.2	21.2	22.4	
	7.5	17.6	21.3	24.5	23.9	18.8	20.7	22.0	22.7	
	12.5	19.4	21.6	25.4	23.1	19.4	21.1	22.0	22.5	
	17.5	17.7	20.0	21.9	19.8	19.0	20.6	21.4	21.6	
	22.5	15.1	18.4	17.9	17.5	17.5	19.3	19.9	20.0	
	27.5	7.4	9.0	9.6	7.0	11.0	15.6	16.3	16.3	
	32.5	7.3	8.5	8.0	6.6	9.0	9.0	9.0	9.0	
	37.5	6.0	6.3	6.2	6.5	9.0	9.0	9.0	9.0	
	42.5	6.0	5.9	7.6	6.0	9.0	9.0	9.0	9.0	
47.5	6.6	5.1	8.0	5.4	9.0	9.0	9.0	9.0		

表 4(续)

时间/h	深度/ cm	土壤含水量实测值				土壤含水量模拟值				时间/h	深度/ cm	土壤含水量实测值				土壤含水量模拟值			
		F ₀	F ₁	F ₂	F ₃	F ₀	F ₁	F ₂	F ₃			F ₀	F ₁	F ₂	F ₃	F ₀	F ₁	F ₂	F ₃
48	0.0	11.0	21.2	25.2	27.2	8.2	20.0	23.0	24.0	96	0.0	9.8	16.4	19.1	20.6	8.2	16.4	19.2	20.6
	2.5	15.4	22.2	26.2	25.9	17.1	21.3	23.4	24.2		2.5	13.1	22.0	23.2	23.5	15.5	18.0	19.9	21.1
	7.5	20.3	23.7	26.5	24.0	20.0	22.6	23.8	24.2		7.5	18.0	24.4	23.4	23.5	18.0	19.7	20.8	21.6
	12.5	20.6	20.6	21.2	19.0	20.6	22.6	23.4	23.7		12.5	18.6	22.3	23.7	21.6	18.6	20.1	21.0	21.5
	17.5	21.6	20.8	20.8	23.1	20.0	21.8	22.4	22.5		17.5	18.4	18.3	18.6	19.0	18.4	19.8	20.6	21.0
	22.5	17.1	18.8	16.7	16.7	17.6	19.6	20.1	20.1		22.5	16.1	17.8	17.1	16.4	17.2	18.8	19.5	19.7
	27.5	2.9	3.0	9.1	5.9	9.1	11.4	12.1	11.5		27.5	7.1	8.2	9.3	5.6	13.3	16.3	17.1	17.2
	32.5	5.1	4.1	8.8	7.8	9.0	9.0	9.0	9.0		32.5	5.7	6.9	7.6	4.5	9.0	9.0	9.1	9.1
	37.5	5.5	3.9	9.5	5.7	9.0	9.0	9.0	9.0		37.5	4.5	8.3	8.2	5.4	9.0	9.0	9.0	9.0
	42.5	6.0	4.2	10.5	4.8	9.0	9.0	9.0	9.0		42.5	7.3	6.3	8.8	4.1	9.0	9.0	9.0	9.0
47.5	6.3	1.8	6.9	5.0	9.0	9.0	9.0	9.0	47.5	7.4	5.6	7.7	5.9	9.0	9.0	9.0	9.0		

24 h 时, F₀ 的地表土壤含水量已经降低至 11%, 2.5 cm 浅层土壤的土壤含水量为 18.9%; F₁、F₂、F₃ 的地表土壤含水量为 25.1%~26.7%, 2.5 cm 浅层土壤含水量为 25.7%~30.1%。可以看出, F₁、F₂、F₃ 由于受到松针覆盖的影响, 土壤蒸发量大幅减少, 土壤含水量在各个深度上都高于 F₀ 的。96 h 时, F₀ 的地表土壤含水量为 9.8%, 2.5 cm 浅层土壤含水量为 13.1%; F₁、F₂、F₃ 的地表土壤含水量分别为 16.4%、19.1%、20.6%, 相较于 F₀ 的提升比例分别为 67.3%、94.9%、110.2%; 2.5 cm 浅层土壤含水量分别为 22.0%、23.2%、23.5%, 相较于 F₀ 提高了 67.9%、77.1%、79.4%。

7.5~17.5 cm 深度下, F₀ 的含水量受到蒸发和入渗的影响持续减少, 土壤含水量由 24 h 时的 19.7%~21.2% 减少至 96 h 时的 18.0%~18.6%; F₁、F₂、F₃ 在该深度下的土壤含水量相比 F₀ 均有提升, 但 F₁、F₂、F₃ 之间的土壤含水量差距并不明显。

>20 cm 深度下, 4 种处理的土壤含水量差距较小, 这是由于深层土壤受蒸发的影响较小, 其含水量变化主要取决于初期入渗的水量。但透过有机玻璃管观察土壤剖面, 发现土壤含水量产生明显变化的深度, 即湿润锋的深度, 4 种处理间仍有区别, 96 h 时, F₀、F₁、F₂、F₃ 的湿润锋深度分别为 29.5、31.8、32.3、32.5 cm, 总体呈现出逐渐增加的趋势。

土壤含水量的空间分布受到蒸发能力和土壤入渗能力 2 种因素的影响。深度 5 cm 以上的浅层土壤受蒸发的影响较大, 含水量相对较低; 20 cm

以下的深层土壤受到入渗能力的限制, 土壤含水量也较小; 5~20 cm 深度的土壤受蒸发和入渗能力的影响都较小, 含水量较高。F₀ 由于没有松针覆盖, 蒸发量较高, 浅层土壤的含水量较低, 而 F₁、F₂、F₃ 由于受到松针覆盖的影响, 土壤蒸发量大幅减少, 土壤含水量在各个深度上都高于 F₀ 组。24 h 时, F₂ 和 F₃ 的土壤含水量在各深度上均较为接近, 这是由于土柱前期的蒸发量主要来自覆盖层, 土壤内的水分蒸发量很小; F₁ 的松针覆盖层在 24 h 时已经较为干燥, 土壤蒸发的速度相对更高, 土壤表面的含水量相比 F₂ 和 F₃ 更低; F₂、F₃ 覆盖层内部仍比较湿润, 土壤蒸发速度较慢, 土壤内部的水分空间分布几乎相同。96 h 时, 由于土壤表面已经比较干燥, 含水量变化较小, F₀ 土壤表面的含水量为 9.8%, 随着松针覆盖层内部水量的逐渐减少, F₁、F₂、F₃ 的土壤含水量分布开始产生差别, 受水分蒸发影响最剧烈的 F₁、F₂、F₃ 的土壤表面含水量依次减少; 深层土壤受蒸发的影响较小, 其含水量变化主要取决于初期入渗的水量, F₁、F₂、F₃ 的深层土壤含水量较为接近, 湿润锋深度均处于 32.0~32.5 cm 内, 其中, F₂ 和 F₃ 由于前期的土壤含水量变化几乎一致, 后期深层土壤中的土壤含水量也较为接近。

从表 5 可知, 模拟值与实测值间的均方根误差均低于 0.025, 相关系数均高于 0.6, 表明模拟土壤含水量与实测值较接近, 该模型能较好地预测松针覆盖条件下的土壤含水量的变化趋势, 具有较好的模拟效果。

表 5 不同位置土壤含水量模拟值与实测值间的均方根误差和相关系数

Table 5 The root mean squared errors and correlation coefficients between simulated and measured soil water contents at different locations

处理	样本数	均方根误差	相关系数
F ₀	20	0.018 2	0.626 7
F ₁	20	0.018 0	0.614 7
F ₂	20	0.024 0	0.672 8
F ₃	20	0.019 5	0.651 7

4 结论与讨论

本试验条件下,松针覆盖层对土壤蒸发量的影响主要源于以下 2 种效应:①覆盖层阻隔了到达下垫面土壤表面的热能,对土壤造成类似遮阴的影响,降低了下垫面土壤所受到的热辐射,减少了土壤的潜热变化;②覆盖层会截留一部分降水,这些水分在覆盖层内部蒸发,且蒸发量相对于下垫面土壤更大,从而提高了整个土柱的蒸发量。由于相同厚度的覆盖层对热辐射的透射率相同^[14],随着覆盖量的逐渐增大,到达土壤表层的热能会呈指数形式逐渐减少,F₀、F₁、F₂、F₃的累计蒸发量依次减小。同时,虽然松针覆盖层质地疏松,但也不能完全阻隔下垫面土壤与大气的气体交换。在蒸发初期,较厚的覆盖层仍然有效抑制了下垫面土壤的水分蒸发。这可能是由于覆盖层内部的水分蒸发增大了覆盖层内部空气的湿度,从而减小了土壤表层和覆盖层内部的水汽压差,使得土壤中的水蒸气更难以扩散,从而在蒸发初期对下垫面土壤产生进一步的抑制作用。在试验前期,F₁、F₂、F₃的土壤含水量空间分布较为接近;试验后期,各处理组的土壤含水量空间分布也仅在 5 cm 以上的土壤表现出较大的差别。

松针覆盖条件下的土壤水时段蒸发量 E 为覆盖层时段蒸发量(E_{mulch})和土壤层时段蒸发量(E_s)之和。其中, E_s 的变化取决于土壤上方的蒸发阻力和土壤自身因素的变化,即同时受到热辐射量、风速、空气湿度、土壤含水量等因素的影响^[17-18],其变化在规则上遵循土壤蒸发的 3 个典型阶段^[19],即:①常速率阶段,蒸发量主要由土壤表层到土壤层表面大气的水汽压差决定;②减速率阶段,土壤性质因素逐渐成为决定蒸发速率的主要因素;③残余阶段,发生在蒸发的后期,土体毛细水作用逐渐减弱,

蒸发量较小。 E_{mulch} 的大小则受覆盖层的含水量和外界环境控制,覆盖层含水量较高时, E_{mulch} 较大,同时随着覆盖层中的水分逐渐蒸发, E_{mulch} 也逐渐减小。结合松针覆盖层对土壤蒸发量产生影响的作用机制,松针覆盖条件下的土壤水分蒸发过程可以分为以下 4 个阶段:①蒸发初期,土壤和松针覆盖层都具有较高的湿度, E_{mulch} 较高,由于覆盖层内部湿度较大,土壤表层与覆盖层内部的水汽压梯度较小, E_s 受到较强的抑制;②覆盖层内部的液态水逐渐被消耗且不受土壤补给, E_{mulch} 开始减少,同时由于覆盖层湿度减小,水汽压梯度增大, E_s 开始逐渐增大;③覆盖层内部的液态水基本蒸发殆尽, E_{mulch} 接近于 0, E_s 达到极大值;④随着土壤表层水分逐渐蒸发, E_s 遵循土壤蒸发的 3 个典型阶段,且受覆盖层的影响, E 值低于同条件无覆盖处理的土壤蒸发量。

综上所述,松针覆盖层厚度的增加除了能够对下垫面土壤的水分蒸发产生数值上的变化,还能够改变水分蒸发的发生过程。覆盖层截留一部分降水并优先蒸发,使得下垫面土壤内部的蒸发速度极慢,表层土壤有更充足的水分向下渗透,从而增加了土壤的入渗量。同时,覆盖层厚度越大,截留的水分就越多,覆盖层变得干燥的时间就越晚,这也减缓了下垫面土壤蒸发速度的提升,使高覆盖量下土壤蒸发量上升的时刻比低覆盖量下的更晚。从理论和实践上来看,松针覆盖处理是一种行之有效的保水保墒措施,为浅根类中药材的种植管理创造了有利的根区微环境,也是提高农田水分利用效率的一项切实可行的农艺措施。

参考文献:

- [1] QI Y L, OSSOWICKI A, YANG X M, et al. Effects of plastic mulch film residues on wheat rhizosphere and soil properties[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 387: 121711.
- [2] 张哲, 孙占祥, 张燕卿, 等. 覆膜对半干旱区春玉米生长及产量构成的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(3): 231-237.
ZHANG Z, SUN Z X, ZHANG Y Q, et al. Effects of plastic mulch on growth and yield components of spring maize in semi-arid areas[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2016, 42(3): 231-237.
- [3] 徐锴, 张少瑜, 袁继存, 等. 地膜和秸秆覆盖对梨园土壤养分的影响[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(3):

- 421–427.
XU K, ZHANG S Y, YUAN J C, et al. Effects of plastic film and straw mulching on soil nutrients of pear orchard[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2017, 29(3): 421–427.
- [4] 易镇邪, 刘书波, 陈冬林, 等. 不同复种制下秸秆还田对水稻生产能力的影晌[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2013, 39(6): 565–569.
YI Z X, LIU S B, CHEN D L, et al. Effect of straw returning to field on rice productivity in different cropping systems[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2013, 39(6): 565–569.
- [5] 刘倩. 有机覆盖对三七生长和土壤养分及微生物多样性的影响[D]. 昆明: 云南中医药大学, 2019.
LIU Q. Effects of organic mulching on growth and soil nutrient and microbial diversity of *Panax notoginseng* (Burk.) F.H.Chen[D]. Kunming: Yunnan University of Chinese Medicine, 2019.
- [6] 谢立亚, 李纯乾, 白毅. 收获松针对地表径流量和水质的影响[J]. *水土保持科技情报*, 2005(2): 31–33.
XIE L Y, LI C Q, BAI Y. The impact of pine harvest on surface runoff and water quality[J]. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 2005(2): 31–33.
- [7] MOURA E G, MACEDO V R A, SENA V G L, et al. Soil physical changes and maize growth in a structurally fragile tropical soil due to mulching and duration between irrigation intervals[J]. *Soil Use and Management*, 2017, 33(4): 631–638.
- [8] 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 Y, LIU H J, HUANG G H. Modeling resistance of soil evaporation and soil evaporation under straw mulching[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(1): 98–106.
- [9] KADER M A, NAKAMURA K, SENGE M, et al. Numerical simulation of water- and heat-flow regimes of mulched soil in rain-fed soybean field in central Japan[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 191: 142–155.
- [10] 侯召云, 扬帮喜. 松针覆盖育苗技术的探讨[J]. *林业勘察设计*, 2016(1): 49–50.
HOU Z Y, YANG B X. To investigate the mulching techniques of pine needles[J]. *Forest Investigation Design*, 2016(1): 49–50.
- [11] 王炳忠, 申彦波. 太阳常数的研究沿革和进展(上)[J]. *太阳能*, 2016(3): 15–16.
WANG B Z, SHEN Y B. The evolution and progress of solar constant research[J]. *Solar Energy*, 2016(3): 15–16.
- [12] 李少龙, 杨金忠, 蔡树英. 基于 van Genuchten-Mualem 模型的饱和-非饱和介质流动随机数值分析[J]. *水利学报*, 2006, 37(1): 33–39.
LI S L, YANG J Z, CAI S Y. Stochastic numerical analysis of flow in saturated-unsaturated porous media based on van Genuchten-Mualem model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(1): 33–39.
- [13] 曹海涛. 多孔介质中非饱和和流动问题的多尺度方法[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
CAO H T. Multiscale method for unsaturated flow in porous medium[D]. Suzhou, China: Soochow University, 2014.
- [14] 霍思远, 靳孟贵. Van Genuchten 模型参数对降水入渗数值模拟的敏感性[J]. *地球科学*, 2017, 42(3): 447–452.
HUO S Y, JIN M G. Effect of parameter sensitivity of van Genuchten model on numerical simulation of rainfall recharge[J]. *Earth Science*, 2017, 42(3): 447–452.
- [15] 陈卫金, 程东会, 陶伟. van Genuchten 模型参数的物理意义[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(6): 147–153.
CHEN W J, CHENG D H, TAO W. Physical significance of the parameters in the van Genuchten model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(6): 147–153.
- [16] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. *Water Resources Research*, 1976, 12(3): 513–522.
- [17] 杨邦杰, BLACKWELL P S, NICHOLSON D F. 土壤表面蒸发阻力模型与田间测定方法[J]. *地理学报*, 1997, 52(2): 177–183.
YANG B J, BLACKWELL P S, NICHOLSON D F. Soil surface resistance models to evaporation and field measurements[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(2): 177–183.
- [18] 张建华, 赵燮京, 庞良玉, 等. 风干表土对土壤水分蒸发阻力研究[J]. *西南农业学报*, 1999, 12(增刊 1): 56–62.
ZHANG J H, ZHAO X J, PANG L Y, et al. Resistance of air-dry surface-soil for a bare soil evaporation[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 1999, 12(S1): 56–62.
- [19] 欧阳斌强, 唐朝生, 王德银, 等. 土体水分蒸发研究进展[J]. *岩土力学*, 2016, 37(3): 625–636.
OUYANG B Q, TANG C S, WANG D Y, et al. Advances on soil moisture evaporation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(3): 625–636.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳正