

罗皓峰,杨启良. 松针覆盖层厚度和风速对水分蒸发量的影响机制[J]. 江苏农业科学,2020,48(21):249-254.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.21.048

松针覆盖层厚度和风速对水分蒸发量的影响机制

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:松针覆盖处理是中药材种植中常用的土壤保墒方式。为了模拟饱和土壤含水率条件下覆盖层厚度和风速对下垫面水分蒸发的影响,设计了一套风管模拟试验装置。试验设置3个松针覆盖层厚度水平($M_0:0\text{ mm}; M_1:10\text{ mm}; M_2:20\text{ mm}$)和5个风速水平($W_1:1\text{ m/s}; W_2:2\text{ m/s}; W_3:3\text{ m/s}; W_4:4\text{ m/s}; W_5:5\text{ m/s}$)。结果表明:(1)与未覆盖相比,松针覆盖的时段蒸发量显著减小,10 mm厚度的松针覆盖层能够将时段蒸发量降低44.44%~51.00%,但当厚度增大至20 mm时,对水分蒸发的抑制作用并未显著增加;(2)增加风速对下垫面的水分蒸发有一定的促进作用。无覆盖处理下,风速变化量达1 m/s时会显著影响下垫面时段蒸发量,在覆盖处理下,风速变化量达到3 m/s时才会显著影响下垫面的时段蒸发量。因此,松针覆盖处理减小了风速对水分蒸发量的影响。

关键词:松针覆盖;风速;水分蒸发;模拟试验;时段蒸发量

中图分类号:S365 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)21-0249-06

云南是我国中药材资源大省,有中药资源6559种,占全国的51.4%^[1]。中药材的无害化、规范化生产一直是现代农业重要的研究课题。松针覆盖处理是中药材种植中常用的土壤保湿方式,在三七和重楼等中药材的种植中被普遍采用。松针覆盖处理不仅能有效减少土壤蒸发,还能能为三七根际环

境提供良好的透气效果。松针覆盖物对土壤的遮蔽效应还可以缓解天然降雨和灌溉对土壤表面的影响,增大土壤孔隙度,增加土壤入渗能力^[2-3],同时还能显著降低土壤温度,防止三七根灼伤^[4-5]。松针覆盖物还能提高土壤有机质含量,影响三七根区的微生物活性,起到促进三七生长、减少三七病害的作用^[6-10]。此外,相比树枝或秸秆等有机覆盖物,松针对地表的附着性更强,更适合坡度较大的种植田^[11]。研究表明,松针覆盖处理能够显著减少坡地土壤的侵蚀量和径流量^[12],具有保持坡地水土的作用。然而,目前针对松针覆盖物影响土壤蒸发量的研究较少,特别是松针覆盖条件下风速对土壤蒸发量的影响机制尚不清楚。松针覆盖物保水能

收稿日期:2020-04-02

基金项目信息:国家自然科学基金(编号: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方面的研究。E-mail:haofengwork@126.com。

通信作者:杨启良,博士,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:284186040@qq.com。

采摘过程成本、提高果园生产率、提高水果品质,还能促进我国的果园种植业的进步,追踪世界前沿农业技术,推动我国水果采摘的机械化发展。

采摘者只需将伸缩杆长度调至果实的果柄部位,按钮手柄控制剪切刀头,操作简单,无需冗余动作。另外,由于设计结构简单,对所采摘单果的大小基本没有限制,因此,适用范围很广,使用便利,是我国以自主分散经营为主的果农的首选,经济效益及社会效益显著。

参考文献:

[1]段洁利,陆华忠,王慰祖,等. 水果采收机械的现状与发展[J].

广东农业科学,2012,39(16):189-192.

[2]Finney E E. Dynamic elastic properties of some fruits during growth and development[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1967,12(4):249-256.

[3]杨文亮. 苹果采摘机器人机械手结构设计与分析[D]. 镇江:江苏大学,2009.

[4]王凤云,刘继展,李萍萍. 采摘机器人末端执行器研究现状与展望[J]. 农机化研究,2011,33(11):10-14.

[5]顾宝兴,姬长英,王海青,等. 智能移动水果采摘机器人设计与实验[J]. 农业机械学报,2012,43(6):153-160.

[6]马质璞,张抗,谭骥,等. 一种新型单果采摘器的设计[J]. 机械设计与制造,2017(5):252-255.

[7]雷旺雄,卢军. 葡萄采摘机器人采摘点的视觉定位[J]. 江苏农业学报,2020,36(4):1015-1021.

力的相关参数众多且难以准确获取,风速、水分输入量、覆盖层厚度等参数都会影响覆盖物的空气动力学阻力,从而改变覆盖物对土壤水蒸发的阻滞能力,这些因素都为针对松针覆盖物的研究增加了难度^[13-15]。

秸秆覆盖物是一种典型的有机覆盖物,形成的覆盖层具有和松针覆盖层相似的物理结构和物质构成,其对下垫面产生的影响也和松针覆盖层类似,具有一定的参考价值。目前国内外学者针对松针覆盖物对下垫面影响的研究已经发展至作用机制层面。Qiu 等对比沙石覆盖物在不同厚度和粒径下蒸发阻力的变化,发现其蒸发阻力随覆盖物厚度的增加先以指数形式增加,后以负指数形式增加,且随粒径的增大呈负指数形式减少^[16]。该研究结果为其他土壤覆盖物对下垫面水分蒸发的影响研究提供了依据^[16]。Fuchs 等通过风管试验比较秸秆覆盖物 and 不同粒径的沙石覆盖物对下垫面水分蒸发阻力的大小,并结合试验数据导出覆盖层厚度和孔隙度与蒸发阻力的数学关系,试验结果表明秸秆覆盖物和沙石覆盖物的蒸发阻力均随风速的增加而减少^[17]。该研究认为风在覆盖物的孔洞和缝隙中产生湍流运动,从而降低了蒸汽通过覆盖物的阻力,而这种湍流运动会达到一定深度时减弱,从而使蒸发阻力随风速增加呈负指数形式减少,最后趋于一个定值^[17]。因此,覆盖物厚度的增加能够显著提高蒸发阻力。粗砾石等孔隙较大的覆盖物在风场条件下的蒸发阻力较低,细颗粒材料受风场的影响较少,并可保持较高的蒸发阻力。吴凯等将秸秆类覆盖物在土壤上形成的阴影形状划分为“米”字、“田”字、三角形 3 种模式,并通过统计不同阴影模式下与试验区域网格线交叉的秸秆数量,推算出试验区域内秸秆的广义间距^[18]。试验据此将秸秆覆盖物的阴影模式、秸秆平均直径、秸秆广义间距 3 种因素与秸秆覆盖率进行定量分析,推导出不同阴影模式下利用秸秆广义间距推算覆盖率的公式^[18]。李晓明等通过室内模拟试验方法,研究不同风速和秸秆覆盖量对土壤水分蒸发的影响;结果表明,土壤水分蒸发受风速和秸秆覆盖的影响较大;当秸秆覆盖量较大时,风速对土壤蒸发量的影响显著降低^[19]。这些研究结果都在理论或试验方法方面为松针覆盖层的研究提供了参考依据。

虽然目前国内外学者对于秸秆等有机覆盖物开展了大量的研究,但针对松针覆盖层厚度和风速

共同作用下对松针覆盖层下垫面水分蒸发的影响的研究还很少,传统风速试验中,风速在空间上的均匀性较差导致土壤蒸发的差异性较大^[20-21]。本研究是以松针覆盖物在不同风速条件下对下垫面潜在蒸发量的作用机制和获得适宜的松针覆盖层厚度为研究目的设计的试验,以期在遮阴和覆盖条件下松针覆盖层厚度的合理选择、风速对农田水分消耗规律的影响以及蒸散发模型和 SPAC 系统水分传输模型的参数获取提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置设计

如图 1 所示,装置主体由一根直径 150 mm 的丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物 (ABS) 管构成,长度为 1 500 mm,主管向下延伸出 2 根支管,长度为 100 mm,支管统一向下放置,起到封闭和支撑的作用,支管内加设 1 层 18 目方孔铁丝网,用于放置松针覆盖层。每个支管中均放置有 3 个玻璃蒸发皿,口径为 95 mm,蒸发皿上方设置有小型指针式温湿度计。风管左侧连接 1 台功率 550 W 的鼓风机。管道与鼓风机之间用布制的口袋连接,为了向管内提供恒定的风速,管道与鼓风机出风口之间呈 90° 夹角,并在口袋与风管的连接处加设 1 层网格,以消除鼓风机出口处的空气动能,让管道内的风速仅由鼓风机的空气流量控制,减小管道内部的紊流现象。使用变压开关可以控制鼓风机的转速,控制管内的风速。

1.2 试验设计

本试验开始于 2018 年 11 月,试验地点位于昆明理工大学农业与食品学院实验室 (102°52'N, 24°51'E),海拔 1 970 m,标准气压 79.14 kPa,试验装置放置于室内遮阴避风处,避免日光照射和自然风的影响。试验所使用的覆盖物为自然风干的云南松松针,平均长度为 13.22 cm,烘干法测得其残余含水量为 0.271%,干物质密度为 0.617 g/cm³。

本试验为模拟不同覆盖程度下松针覆盖层对水蒸气扩散的阻滞作用,分别设置了松针覆盖层厚度和风速 2 个变量。其中,松针覆盖层厚度设置了 3 个水平 (M_0 :0 mm; M_1 :10 mm; M_2 :20 mm),相对应的松针覆盖量分别为 0、0.116、0.232 g/cm²。每种处理均采用三七、重楼等中药材田间种植管理中常用的铺设方法均匀布设。同时,设置了 5 个风速水平 (W_1 :1 m/s; W_2 :2 m/s; W_3 :3 m/s; W_4 :4 m/s;

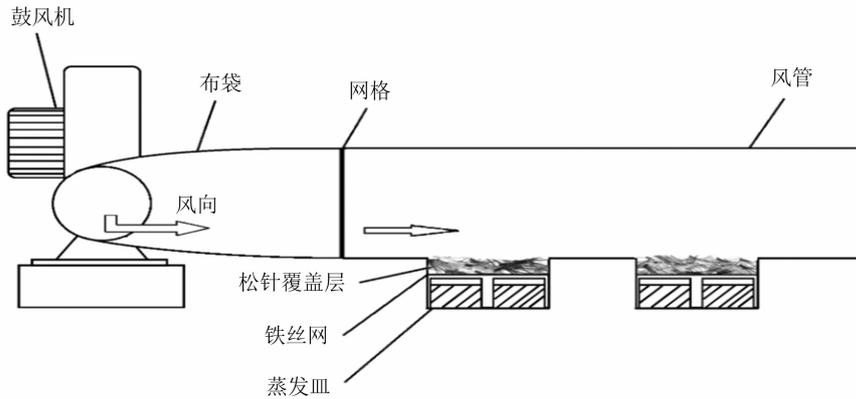


图1 试验装置示意

W_5 :5 m/s),每个处理均设置3次重复,试验组处理 如表1所示。

表1 水分蒸发影响因子的试验设计

处理	覆盖层厚度 (mm)	风速 (m/s)	处理	覆盖层厚度 (mm)	风速 (m/s)	处理	覆盖层厚度 (mm)	风速 (m/s)
T ₁₁	M ₀	W ₁	T ₁₂	M ₁	W ₁	T ₁₃	M ₂	W ₁
T ₂₁	M ₀	W ₂	T ₂₂	M ₁	W ₂	T ₂₃	M ₂	W ₂
T ₃₁	M ₀	W ₃	T ₃₂	M ₁	W ₃	T ₃₃	M ₂	W ₃
T ₄₁	M ₀	W ₄	T ₄₂	M ₁	W ₄	T ₄₃	M ₂	W ₄
T ₅₁	M ₀	W ₅	T ₅₂	M ₁	W ₅	T ₅₃	M ₂	W ₅

试验时间选在晴朗的下午,试验期间实验室内的温度和湿度相对稳定。室内气温为20~26℃,平均气温为23.7℃。大气湿度为22%~32%,平均湿度为26.1%。由于试验装置不受阳光照射,且内部空气流量较大,装置内部的温度与室温相差较小。向每个蒸发皿中加入300 mL清水,随后放置于精度为0.01 g的电子天平上称质量并记录。启动鼓风机,使用AT816一体式风速计测量管内的风速,并调节变压开关使风速达到预定值。每次试验持续3 h,每隔1 h将蒸发皿取出重新称质量,同时读取并记录蒸发皿上方的温湿度值和室内的温湿度值。通过计算每次称质量测得的质量差值即可算得该时段内的水面蒸发量。

1.3 显著性分析

为了分析不同水平松针覆盖层厚度处理和不同水平风速2项变量对蒸发皿时段蒸发量的影响,采用SPSS软件对试验数据进行显著性分析,由于本次试验每组的样本数量小于30($n < 30$),故采用配对样本 t 检验和单变量分析法的一般线性模型(GLM)进行显著性分析和方差分析,置信区间设置为95%。

2 结果与分析

2.1 时段蒸发量与松针覆盖层厚度的关系

由图2可知,当无松针覆盖处理时,水受大气蒸发力的影响自由扩散,扩散速度随风速的增大整体增大。不同处理间时段蒸发量的均值大小顺序为 $T_{41} > T_{51} > T_{31} > T_{21} > T_{11} > T_{42} > T_{32} > T_{53} > T_{52} > T_{43} > T_{22} > T_{33} > T_{23} > T_{12} > T_{13}$ 。与无松针覆盖的蒸发皿相比,有松针覆盖的蒸发皿的时段蒸发量均值均明显降低。在不同的风速水平下,松针覆盖处理都对水分的蒸发产生了较强的抑制作用。其中, M_1 覆盖水平下的试验组在不同风速下的时段蒸发量为0.34~0.56 mm,相比无覆盖处理的试验组降低44.44%~51.00%, M_2 覆盖处理下试验组的时段蒸发量为0.31~0.54 mm,相比无覆盖处理的试验组降低47.21%~62.07%。时段蒸发量均值的大小随松针覆盖层厚度的增大普遍呈逐渐减小的趋势。 T_{41} 、 T_{52} 试验组的时段蒸发量数据呈现出与整体趋势不符的变化,这可能是由于受到了风管内部紊流的影响。

以同水平风速条件下不同松针覆盖水平试验

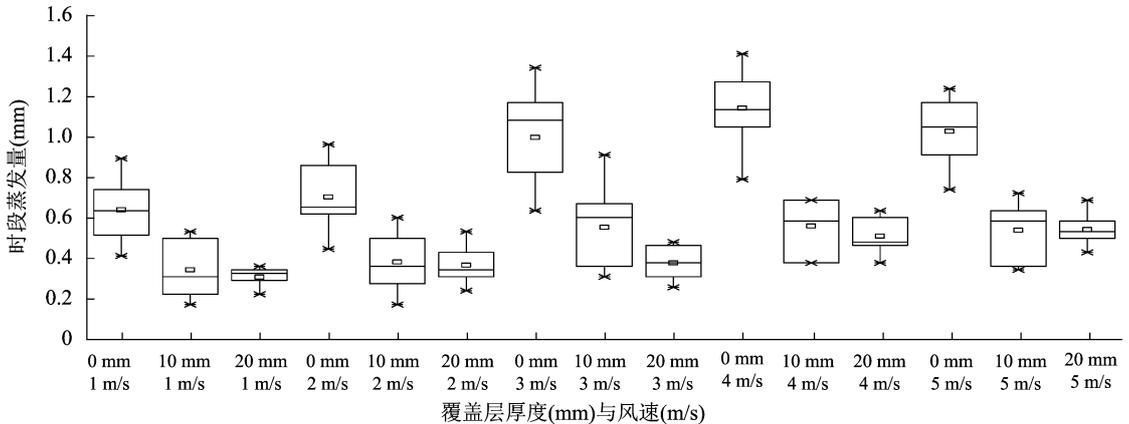


图2 风速和松针覆盖厚度对时段蒸发量的影响

组的时段蒸发量测量值为配对样本进行配对样本 t 检验,分析松针覆盖量的变化对下垫面时段蒸发量的影响。如表 2 所示,在 5 种风速处理下,覆盖水平 M_0 与 M_1 之间的时段蒸发量均呈极显著差异,除了 T_{32} & T_{33} 配对呈现较显著差异外, M_1 与 M_2 之间的时段蒸发量无显著性差异。这表明,相比无覆盖处理,10 mm 的松针覆盖处理对下垫面的水分蒸发呈现出显著的抑制作用,但当覆盖量增加至 20 mm 时,对水分蒸发的抑制作用与 10 mm 相比并未显著增加。

表 2 不同覆盖量对时段蒸发量影响的显著性分析

配对	t 值	自由度	显著性
T_{11} & T_{12}	17.522 24	8	***
T_{12} & T_{13}	0.727 15	8	
T_{21} & T_{22}	21.965 01	8	***
T_{22} & T_{23}	0.352 87	8	
T_{31} & T_{32}	14.132 16	8	***
T_{32} & T_{33}	2.941 46	8	*
T_{41} & T_{42}	17.471 41	8	***
T_{42} & T_{43}	1.164 80	8	
T_{51} & T_{52}	17.879 82	8	***
T_{52} & T_{53}	-0.103 56	8	

注: *、**、*** 分别表示在 0.1、0.05、0.01 水平上差异显著。下同。

2.2 时段蒸发量与风速的关系

在整个蒸发过程中,所有覆盖层厚度水平下的蒸发皿的时段蒸发量均值均与风速呈正相关关系。由于松针覆盖层具有一定的透气性,不能完全阻隔空气的流通,风速的不同仍会对覆盖条件下的水分蒸发产生影响。试验结果表明,当风速从 W_1 逐级上升至 W_5 时, M_0 覆盖水平试验组的时段蒸发量上

升 9.85% ~ 78.51%; M_1 覆盖水平试验组的时段蒸发量上升 11.11% ~ 62.78%; M_2 覆盖水平试验组的时段蒸发量上升 19.26% ~ 76.40%。综上所述,在同水平覆盖处理下,风速增加时,时段蒸发量不断增加,风速的增加对水分蒸发产生了促进作用。

为了分析相同水平覆盖条件下不同风速对时段蒸发量的影响,将所有风速水平差值为 1 m/s 的试验组两两配对,进行样本 t 检验,结果如表 3 所示。可以看出,在 M_0 松针覆盖水平下,不同风速水平下的时段蒸发量均呈现出显著性差异,这表明无覆盖条件下,每一次风速水平的变化都对试验中的水分蒸发产生了显著影响。然而, M_1 和 M_2 松针覆盖处理下有 62.5% 的配对表现为较显著差异或极显著差异,这表明 1 m/s 的风速变化不一定会对采用松针覆盖处理的试验组的时段蒸发量产生显著性影响,松针覆盖处理减小了风速对水分蒸发的影响。相比无覆盖处理组,覆盖处理组可能需要更大的风速才能对其下垫面水分蒸发量产生显著影响。这是由于松针覆盖层的透气性,覆盖处理无法完全隔绝风速对蒸发的影响。将同覆盖水平下风速水平差值为 3 m/s 的试验组(W_1 与 W_4 ; W_2 与 W_5) 风速下的时段蒸发量数组进行配对 t 检验(表 4),检验结果均呈极显著差异。也就是说,试验条件下,当风速变化量超过 3 m/s 时,风速仍然能对覆盖条件下的水分蒸发产生显著性影响。松针覆盖条件下风速对下垫面水分蒸发的影响仍然符合与风速成正相关的变化趋势,但其变化幅度已经大幅减小。表明松针覆盖处理减小了风速对水分蒸发的影响。

2.3 时段蒸发量的主要影响因素分析

为了研究覆盖层厚度和风速对时段蒸发量的影响程度,判定时段蒸发量的主要影响因素,使用

表3 不同风速对时段蒸发量影响的显著性分析

配对	<i>t</i> 值	自由度	显著性
T ₁₁ & T ₂₁	-2.5071	8	**
T ₂₁ & T ₃₁	-9.5969	8	***
T ₃₁ & T ₄₁	-2.2793	8	**
T ₄₁ & T ₅₁	2.566 0	8	**
T ₁₂ & T ₂₂	-1.7541	8	*
T ₂₂ & T ₃₂	-6.470 0	8	***
T ₃₂ & T ₄₂	-0.1747	8	
T ₄₂ & T ₅₂	1.8462	8	*
T ₁₃ & T ₂₃	-2.0352	8	*
T ₂₃ & T ₃₃	-0.5898	8	
T ₃₃ & T ₄₃	-9.8072	8	***
T ₄₃ & T ₅₃	-1.4118	8	

注:风速水平差值为 1 m/s。

表4 不同风速对时段蒸发量影响的显著性分析

配对	<i>t</i> 值	自由度	显著性
T ₁₁ & T ₄₁	-10.414	8	***
T ₂₁ & T ₅₁	-17.847	8	***
T ₁₂ & T ₄₂	-9.637	8	***
T ₂₂ & T ₅₂	-4.248	8	***
T ₁₃ & T ₄₃	-7.586	8	***
T ₂₃ & T ₅₃	-6.334	8	***

注:风速水平差值为 3 m/s。

一般线性模型(GLM)单变量分析法对测量值进行双因素方差分析。用真实显著性差异(Tukey)法进行方差分析,以检测不同样本组之间的总体方差是否相同。

经过误差方差等同性的 Levene 法对零假设的检验,发现不同样本组间的因变量,即时段蒸发量对应的 *P* 值大于 0.05,这表明样本值符合方差齐性假设,不同水平的总体方差相等,可以进行进一步的参数检验。主体间效应检验结果显示,覆盖量和风速 2 个固定因子所对应的 *P* 值均小于 0.01。这表明覆盖量和风速均能对时段蒸发量产生极显著性影响,2 种因素都是时段蒸发量的主要影响因素。同时,在对覆盖水平的多重比较检验中, M₀ 覆盖水平和 M₁ 覆盖水平呈现出极显著影响,而 M₁ 和 M₂ 覆盖水平间影响的差异并不完全都显著,表明覆盖层厚度从 10 mm 增至 20 mm 时,产生的影响并不完全显著。

将不同覆盖水平蒸发皿的时段蒸发量样本值配对进行方差分析,发现 M₀ 和 M₁ 配对的样本方差

分析中,时段蒸发量对覆盖量和风速都表现出极显著影响,而 M₁ 和 M₂ 配对中,时段蒸发量对风速仍表现出极显著影响,但对覆盖量仅表现出显著影响,这说明当覆盖量从 10 mm 增加至 20 mm 时,松针覆盖处理所产生的影响较 0 mm 增至 10 mm 有所减弱。可以推断,如果继续增大覆盖量,风速可能成为影响时段蒸发量的主要因素。

3 讨论

松针覆盖层厚度和风速大小都是时段蒸发量的主要影响因素,都能对其下垫面的水分蒸发量产生极显著性影响。

3.1 松针覆盖降低水分蒸发的作用机制

松针覆盖层的存在会显著减小时段蒸发量的大小,10 mm 厚度的松针覆盖层能够将时段蒸发量降低 44.44% ~ 51.00%,影响显著。但厚度增大至 20 mm 时,对水分蒸发的抑制作用并未显著增加。因此,在中草药(三七、重楼等)种植管理中,有利于降低土壤蒸发量的适宜松针覆盖层厚度为 10 mm。

松针等有机覆盖层对水分蒸发产生抑制作用的主要机制可分为能量和分子扩散^[14,22]:一方面,覆盖层阻隔了到达覆盖层下方的下垫面的热辐射,对下垫面形成类似遮阴的效果,降低了下垫面的潜热变化;另一方面,覆盖物阻滞了水蒸气的扩散,提高了水蒸气向大气的扩散阻力,从而减缓了水分子扩散的速率。本试验在室内进行,与室外试验相比,水分的蒸发不会受到太阳辐射的影响。因此,本试验所讨论的松针覆盖层对水分蒸发的抑制作用主要是针对分子扩散。在实际应用中,还需考虑松针覆盖层对太阳辐射的遮挡作用。

另外,本试验中的覆盖层在整个试验过程中都保持干燥。这意味着水蒸气在覆盖层中的传导率是恒定的。事实上,松针或秸秆类的有机覆盖层可以看做是一层多孔结构的介质层,当水分通过覆盖层时,部分水量会截留在覆盖层内部。截留的水分会增大覆盖层内部空气的湿度,增强对下垫面水分蒸发的抑制能力。

3.2 风速影响水分蒸发的作用机制

风速的大小是松针覆盖条件下水分蒸发的重要影响因素。风速的增加对 0、10、20 mm 松针覆盖处理下的水分蒸发均表现出促进作用。在无覆盖(0 mm)的试验组中,风速变化量达到 1 m/s 就能对下垫面的时段蒸发量产生显著影响,而对于覆盖处

理组需要风速变化量达到 3 m/s 时才能对下垫面的时段蒸发量产生显著影响。因此,松针覆盖处理减小了风速对水分蒸发的影响,松针覆盖条件下(10 mm 与 20 mm 比较)影响水分蒸发量的临界风速变化量为 3 m/s。因此在实际应用中,经过松针覆盖处理的农田需要考虑风速对蒸发量的影响,可以用 3 m/s 的间隔为风速划定不同的风力等级,并为不同的等级制定不同的灌溉制度。

松针覆盖处理会使近地层的粗糙度增大,增强对空气的扰动,并且覆盖层在大气和下垫面间形成了一个疏松的隔离层,切断了大气与下垫面的直接接触^[23],因此覆盖层能够削弱风速对下垫面水分蒸发的促进作用,达到减少蒸发的目的。从理论和实践上来说,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。

4 结论

本试验研究了松针覆盖条件下不同覆盖层厚度和不同风速对水面蒸发量的影响,得到 4 点结论。(1)松针覆盖层厚度和风速大小均能对其下垫面的水分蒸发量产生显著影响。(2)松针覆盖层的存在会显著减小时段蒸发量的大小,10 mm 厚度的松针覆盖层能够将时段蒸发量降低 44.44% ~ 51.00%。(3)水分蒸发量随风速的增大而增大。本试验条件下,在无松针覆盖时,显著影响时段蒸发量的临界风速变化量是 1 m/s,而有松针覆盖时,显著影响时段蒸发量的临界风速变化量是 3 m/s。因此松针覆盖处理减小了风速对水分蒸发的影响。(4)本试验条件下有利于降低中药材种植过程中水分蒸发的适宜松针覆盖层厚度为 10 mm,其影响水分蒸发量的临界风速变化量为 3 m/s。

参考文献:

- [1] 窦秦川,黄新动,太一梅,等. 云南中药材种植常见病虫草鼠害综合防治[J]. 云南农业,2014(3):25-26.
- [2] 王进鑫,黄宝龙,王迪海. 不同地面覆盖材料对壤土浑水径流入渗规律的影响[J]. 农业工程学报,2004,20(6):68-72.
- [3] 刘继龙,李佳文,周延,等. 秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响[J]. 农业机械学报,2019,50(7):333-339.
- [4] 沈晓莉. 枯落松针覆盖对场圃种子萌发和幼苗生长的效应研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2012.
- [5] 魏一钊,陈军锋,高旭光,等. 不同秸秆覆盖厚度下季节性冻融土壤的水热运移规律模拟研究[J]. 节水灌溉,2019,292(12):27-31.
- [6] 阎世江,田如霞,刘洁,等. 设施蔬菜秸秆覆盖技术研究进展[J]. 山西农业科学,2018,46(10):1756-1759.
- [7] 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.
- [8] 杨水辉,武继承,吴普特,等. 秸秆覆盖与保水剂对土壤结构、蒸发及入渗过程的作用机制[J]. 中国水土保持科学,2009,7(5):70-75.
- [9] 邹石龙. 三七种植现状及其种植技巧分析[J]. 农业与技术,2018,38(4):119.
- [10] 朱泓,董珊珊,王小敏,等. 溧水区长期松针覆盖蓝莓园土壤质量调查[J]. 基层农技推广,2016,4(8):44-46.
- [11] 吕凯,段颖丹,吴伯志. 秸秆覆盖对种植烤烟坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. 南方农业学报,2019,50(11):2450-2458.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 汪可欣,付强. 免耕覆盖条件下田间土壤水分入渗的二维数值模拟研究[J]. 灌溉排水学报,2012,31(4):127-130.
- [15] 车明轩,官渊波,Muhammad N K,等. 不同雨强、坡度对秸秆覆盖保持水土效果的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(2):131-135,142.
- [16] 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(B):1908-1913.
- [17] Fuchs M, Hadas A. Mulch resistance to water vapor transport [J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(6):990-998.
- [18] 吴凯,王千. 秸秆类覆盖物的覆盖参数的研究[J]. 农业工程学报,1997,12(A):282-287.
- [19] 李晓明,王飞,胡林,等. 风速和秸秆覆盖对土壤水分蒸发影响的模拟试验研究[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(3):186-190.
- [20] 沈渭吉. 风对土壤水分蒸发的影响[J]. 甘肃科技,2011,27(19):186-188.
- [21] 黄雄. 风和光照对土壤水分蒸发的影响及保水措施的研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2011.
- [22] 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 & Tillage Research, 2019, 191:31-33.
- [23] 方文松,朱自玺,刘荣花,等. 秸秆覆盖农田的小气候特征和增产机理研究[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(6):123-128.