

不同防护措施下流沙地表层温湿度的日变化特征

范严伟, 史金红, 唐兴鹏

(兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: [目的] 探讨不同防护措施下流沙地表层温湿度变化规律及其影响机理, 为沙漠区植被恢复提供理论依据。[方法] 采用野外大田试验, 设置 5 种防护措施(单管防护、管裹反光膜、管壁开孔、管内覆秸秆和双管防护), 3 种管径(75, 90, 110 mm)和 3 种露地高度(10, 15, 20 cm), 以无防护流沙地表为对照, 依托土壤温湿度记录仪对地表层温湿度日变化特征进行研究。[结果] 5 种防护措施均能起到降温作用, 其中双管防护降温效果最好; 同一防护措施下, 06:00 时刻管内地表层温度随管径的增大而增大, 其他时段则随管径的增大而降低, 而全天时段管内地表层温度随露地高度的增大而降低; 管内地表层温度随流沙地表层温度的增大而增大, 两者具有良好的线性关系($R^2 \geq 0.830$); 与无灌溉相比, 灌溉在白天时段(06:00—21:00)起降温作用, 而夜间时段(21:00—06:00)起保温作用; 管内地表层水热存在耦合效应, 地表层含水率越高, 其温度越低。[结论] 双管防护+灌溉措施最有利于流沙地表层控温保水, 其中最佳管径参数是管径 110 mm 和露地高度 20 cm。

关键词: 流沙地表; 管径防护; 地表层; 温湿度; 灌溉

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)06-0072-09

中图分类号: S728.4

文献参数: 范严伟, 史金红, 唐兴鹏. 不同防护措施下流沙地表层温湿度的日变化特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 72-80. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.010; Fan Yanwei, Shi Jinhong, Tang Xingpeng. Diurnal variation characteristics of temperature and water content in quicksand surface layer under different protective measures [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 72-80.

Diurnal Variation Characteristics of Temperature and Water Content in Quicksand Surface Layer Under Different Protective Measures

Fan Yanwei, Shi Jinhong, Tang Xingpeng

(College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: [Objective] The variation of temperature and water content in a quicksand surface layer under different protective measures and their influencing mechanisms were investigated in order to provide a theoretical basis for vegetation restoration in a desert area. [Methods] Field tests were carried out to examine five protective measures (single pipe protection, pipe coated with reflective film, pipe wall opening, pipe covered with straw, and double-pipe protection), three pipe diameters (75, 90, 110 mm), and three open field heights (10, 15, 20 cm). The unprotected quicksand surface was used as the control. The diurnal variation characteristics of surface soil temperature and water content were measured using a soil temperature and water content recorder in the quicksand surface layer. [Results] The five protective measures contributed significantly to the cooling effect, with double-tube protection showing the best cooling effect. Under the same protective measures, the surface layer temperature of the pipe interior increased with increasing pipe diameter at 06:00 am, and decreased with increasing pipe diameter at other times. The surface layer temperature of the pipe interior decreased with increasing open ground height during the entire day. The surface layer temperature of the inner tube increased with the surface layer temperature of the quicksand surface layer. Additionally, there was a strong linear relationship between the surface layer temperatures of the inner tube and the quicksand

收稿日期: 2022-12-30

修回日期: 2023-03-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“竖管滴灌节水控温理论研究及其在固沙植物幼苗保育中的应用”(51969013); 甘肃省自然科学基金项目“重力式地下孔灌土壤水分运移规律及调控机理研究”(21JR7RA225)

第一作者: 范严伟(1982—), 男(汉族), 山东省聊城市人, 博士, 副教授, 主要从事水土资源利用和节水灌溉技术研究。Email: fanyanwei24@163.com。

($R^2 \geq 0.830$)。Irrigation cooled the surface layer during the daytime (06:00—21:00) and preserved heat during the nighttime (21:00—06:00). Furthermore, there existed a coupling effect between the surface layer water content and the temperature inside the pipe. This result signified that the higher the surface layer water content, the lower the temperature. [Conclusion] Double-pipe protection and irrigation were found to be the most beneficial to temperature control and water conservation in the surface layer of quicksand. The optimum pipe parameters were a pipe diameter of 110 mm and an open field height of 20 cm.

Keywords: quicksand surface; pipe protection; surface layer; temperature and water content; irrigation

土地沙漠化严重威胁着人类的生存与发展,引起了国际社会的广泛关注和高度重视^[1-2]。中国的沙化土地面积较大,约占国土面积的 17.93%,防治形势十分严峻^[3]。采取有效的防风固沙措施是遏制沙漠扩张和促进局地生境恢复的必然选择^[4-5]。在众多防风固沙措施中,植物固沙是控制风沙灾害和防治沙漠化最有效、最持久和最具潜力的途径之一^[6-8]。然而,在沙漠环境中栽植固沙植物,存在幼苗成活率低以及生长缓慢的瓶颈问题,究其原因主要是由土壤干旱和地表高温所致^[9-12]。沙漠区地形条件复杂,降雨量少且蒸发量大,要破解土壤干旱问题的关键是人为地进行灌溉,以补充植物所需水分^[13]。中国微灌技术起步于 1974 年,经过不断的实践与创新,形成了多个符合区域特色的节水灌溉技术应用模式^[14]。就沙区防护林灌溉工程而言,采用滴灌和根灌技术的较多,它们节水效果显著,很好地解决了植物根区土壤干旱问题^[15-16]。但值得注意的是,沙漠地区夏季阳光直射,气温高,加之地表层(0—5 cm)干燥、裸露,使得地表层极易出现高温现象^[17-19]。麻浩等^[20]研究表明地表层高温会灼伤植物幼苗茎基部,导致其生长停滞甚至死亡,但这一高温胁迫在造林实践中往往被忽视。为此,发明了一种“无灌溉管件防护梭梭荒漠造林新技术”,该技术的核心是使用单管(PVC管)将梭梭幼苗套住,通过管件的防护来降低地表层高温,进而提高梭梭幼苗移栽成活率;王泽等^[21]探究了单管防护下梭梭幼苗的生长状况,发现管件防护在促进苗木生长和养分吸收累积方面效果显著;朱琳等^[22]综合考虑棉花秸秆碎料、风沙土及石膏的配合比,试制了一种石膏基棉秆复合材料防护管。相较于 PVC 管,石膏基棉秆复合材料防护管的抗热性较好,但耐水性较差,灌水易溶蚀,限制了其与灌溉技术的结合^[23-24]。进一步地,范严伟等^[25-26]将地表滴灌技术与管件防护技术相结合,提出了一种“竖管地表滴灌技术”,该技术巧妙地解决了土壤干旱和地表层高温双重胁迫对幼苗的伤害,为植物固沙提供了新的技术手段。目前,针对沙漠区节水灌溉技术优化和高温胁迫植物生理特性等方面的研究相对较多,而关于如何运用技术手段来改善植物根区土壤温湿度的研究是有限的,这

为干旱高温沙漠区防护林建设与管护增加了难度。基于此,本研究以单管防护为基础,尝试对其进行改进,增设 4 种防护措施,通过野外大田试验,研究灌溉前后不同防护措施和管件结构参数条件下管内地表层土壤温湿度日变化特征,分析其影响机理,筛选管件防护最佳控温保墒方案,为沙漠区植被生态恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于甘肃省武威市九墩镇腾格里沙漠边缘,地理坐标为:102°44'E;38°08'N。该区属温带大陆性气候,干旱少雨,多年平均降水量为 110 mm,主要集中在 5—10 月;日照充足,多年平均日照时数 3 049 h;昼夜温差大,夏季最高气温 39.0 °C,最低 13.4 °C,平均为 24.8 °C。为屏蔽地势对试验的影响,保证光照和气流条件的一致性,选取较为平坦且开阔的场地进行试验,试验场地面积为 90 m²,土壤类型为风沙土(如图 1 所示)。

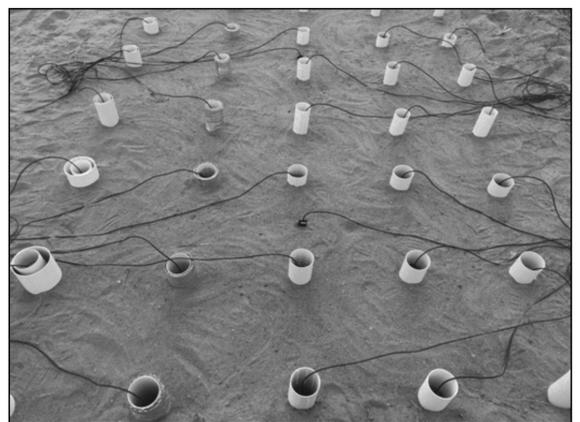


图 1 试验布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of test layout

1.2 试验设计及供试材料

本试验以无防护流沙地表作为对照组,共设置 5 种管件防护措施,分别为:①单管防护;②管裹反光膜;③管壁开孔;④管内覆秸秆;⑤双管防护。每种防护措施下均考虑管件结构参数的差异,其中,管件

直径(d)依据固沙幼苗冠幅大小取常见 PVC 管材规格,分别为 75,90 和 110 mm,露地高度(h)参照幼苗株高取值,分别为 10,15 和 20 cm。具体试验方案详见表 1。为体现土壤水热耦合效应,试验分灌溉与无灌溉 2 个处理。试验前,先将 PVC 管按设定管径和

管高(露地高度+埋深)切割,并依照不同防护措施的实施方法处理管件,然后按间距均为 1 m 排列并埋深至地下 15 cm;然后对灌溉试验组进行管内灌溉(1.5 L),待静置 12 h 后,与无灌溉试验组同步进行数据测量。

表 1 防护管件地表降温试验方案

Table 1 Surface cooling test scheme for pipe protection

方案编号	防护措施	管件直径/mm	露地高度/cm	实施方法
A	单管防护 ^[20]	75,90,110	10,15,20	选取 75,90,110 mm 管件直径的 PVC 管,按不同管件高度(25,30,35 cm)要求进行切割,并将单管插入流沙土中 15 cm
B	管裹反光膜	75,90,110	10,15,20	在单管防护的基础上,将露出地面的管件外壁包裹反光膜,反光膜厚度为 10 mm
C	管壁开孔	75,90,110	10,15,20	在单管防护的基础上,将露出地面的管件管壁均匀打孔,孔径 4 mm,开孔率为 6%
D	管内覆秸秆	75,90,110	10,15,20	在单管防护的基础上,在管内覆作物秸秆,秸秆厚度为 5 cm
E	双管防护	75/90,90/110,110/160	10,15,20	在单管防护的基础上,与管径为 75,90,110 mm 内管相对应,外层再分别套用一支大管径(90,110,160 mm)管件

1.3 测定项目及方法

参考当地天气预报信息,试验选在 2022 年 7 月天气晴朗,气温较高的某一天进行,试验数据的测定从早晨 06:00 至次日 06:00 连续观测 24 h。在试验过程中土壤温湿度传感器分别插入 0—5 cm 深度的无防护措施流沙地表层以及不同防护措施的管件内中心地表层。为体现试验结果的普遍性,取流沙地表层含水量相近的两天进行重复试验,试验结果取 3 次测量数据的平均值。①流沙地表层温度测定。将土壤温湿度传感器探针垂直插入无防护措施的流沙地表层(0—5 cm),考虑土壤空间的差异性,在灌溉和无灌溉 2 个处理试验区对称布置 9 个测点,每 3 h 读

取一次数据,试验结束后,取 9 个传感器的温湿度值的平均值。②管内地表层温湿度测定。将土壤温湿度传感器探针垂直插入试验管件内地表层(0—5 cm),每 3 h 读取 1 次数据,分别记录每次的温湿度值。

2 结果与分析

2.1 防护措施对管内地表层温度的影响

在相同管件直径和露地高度情况下,对 5 种防护措施的降温效果进行分析。选取 $d=110$ mm 和 $h=20$ cm,绘制灌溉前后流沙地与防护措施下不同时刻地表层温度日变化图(如图 2 所示)。

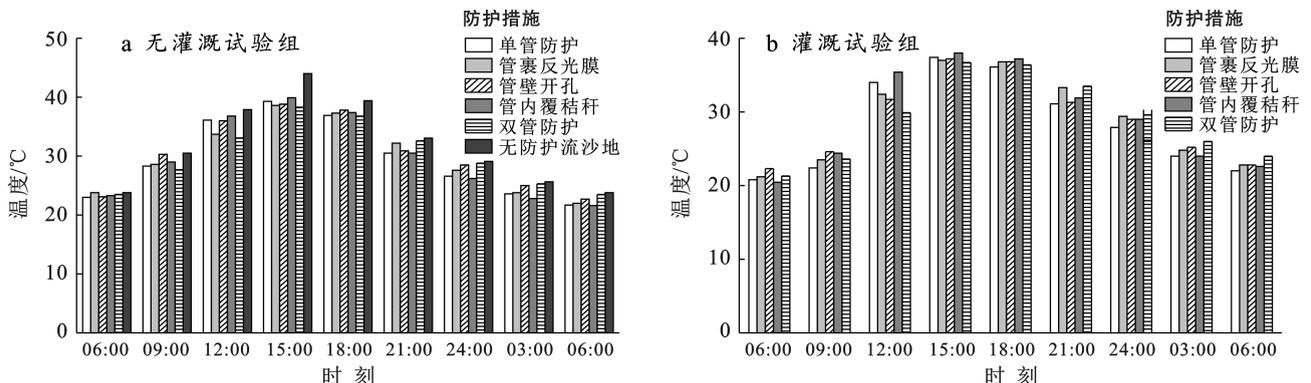


图 2 不同防护措施下地表层温度日变化特征

Fig.2 Diurnal variation characteristics of surface layer temperature under different protective measures

由图 2 可见,无灌溉条件下,5 种防护措施下的管内地表层温度均低于无防护流沙地表层温度,说明 5 种防护措施均对地表层起到降温作用,分析原因应该是防护管件遮挡了部分阳光射入管内地表层,也阻

断了水平向空气中热量向管内的传递。进而,5 种防护措施(管内)和流沙地(管外)的地表层温度均在 15:00 达到最大值并以此为分界点,表现出先递增(06:00—15:00)后递减(15:00—06:00)的正弦曲线

变化规律。在 15:00 时刻,与流沙地表层温度(44.0 °C)相比,双管防护措施降温效果最明显,温度下降了 5.7 °C,其次为管裹反光膜、管壁开孔和单管防护 3 种措施,分别降温 5.4、5.2 和 4.7 °C,而管内覆秸秆温度最高,为 39.9 °C,降温 4.1 °C。由图 2 可知,灌溉条件下,5 种防护措施管内地表层温度同样呈现出正弦曲线日变化,其中管内覆秸秆的振幅最大,为 38.0 °C,而双管防护的振幅最小,为 36.7 °C。对比分析可知,在白天时段(06:00—21:00),5 种防护措施下灌溉试验组管内地表层温度均低于相应无灌溉试验组,如 15:00 时刻,灌溉情况下双管防护的管内地表层温度比流沙地降低了 7.3 °C,比无灌溉双管防护又下降了 1.6 °C,同样的其他 4 种防护措施也有不同程度下降;在夜间时段(21:00—06:00),规律正好相反,灌溉起到了一定的保温作用。例如,24:00 时刻,

双管防护+灌溉措施比双管防护+无灌溉增加了 1.5 °C,其他 4 种防护(单管防护、管裹反光膜、管壁开孔和管内覆秸秆)+灌溉措施比无灌溉分别增加了 1.3、1.8、0.5 和 2.8 °C。这一方面是由于灌溉后管内土壤含水率增加影响了土水比热容,干沙比热容要低于湿沙,导致增温阶段干沙吸热增温和降温阶段干沙放热降温均快于湿沙;另一方面是因为土壤蒸发吸热所致,土壤含水率越高,蒸发越强烈,吸热效果越明显,进而增温越慢。

2.2 管径直径对管内地表层温度的影响

在相同露地高度($h = 20 \text{ cm}$)情况下,对不同防护措施下 3 种管径直径($d = 75, 90, 110 \text{ mm}$)的管内地表层温度变化规律进行分析。图 3 显示了灌溉前后不同管径直径下管内地表层温度随时间的动态变化过程。

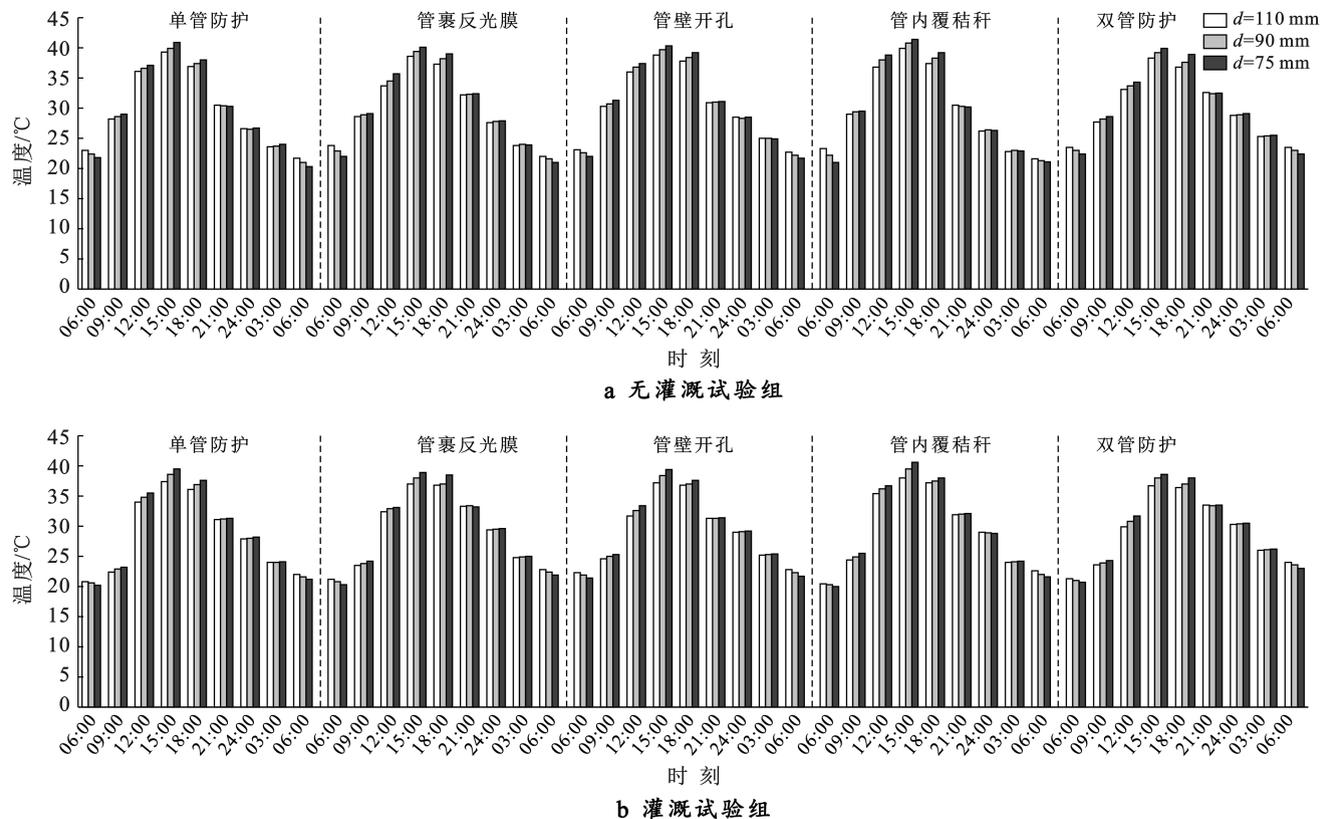


图 3 5 种防护措施下管径直径(d)对管内地表层温度的影响

Fig.3 Effects of pipe fitting diameter (d) on pipe interior surface layer temperature under five protective measures

由图 3 可见,无论是灌溉试验组还是无灌溉试验组,不同防护措施下,3 种管径直径的管内地表层温度变化趋势相同,均呈正弦曲线波动,最低点在 06:00,最高点在 15:00。在 06:00 时刻,管内地表层温度随管径的增大而增大,但增幅较小,在 0.5~2.3 °C 之间波动,这应该是因为管径越大,管内地表层被照射面积越大,导致地表层温度升温越快的缘故。

在 09:00—15:00 时段,管内地表层温度与管径的关系发生反转,出现随管径增大而减小的现象,这可能是由于小管径管内空气流动性差,热量不易散出的原因。进一步分析发现,管径对不同防护措施下地表层温度的影响效果未见显著性差异,变化幅度介于 3.8%~4.2% 之间;另外管径对管内地表层温度影响较大的时段集中在 12:00—18:00,这一时段也是地

表层温度最高时段。对比图 3 可知,与无灌溉相比,灌溉在白天时段起降温作用,而夜间时段起保温作用,其中管内覆秸秆和单管防护措施下 $d=110\text{ mm}$ 的降温效果最好,达到 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,其他防护措施下 $d=110\text{ mm}$ 的温度均降低 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,对于 $d=75\text{ mm}$ 和 90 mm 管件,5 种防护措施的内地表层温度降幅较小,在 $0.8\sim 1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间波动。由此可见,对于灌溉和无灌溉而言,不同防护措施下 3 种管件($d=75, 90, 110\text{ mm}$)中管径为 110 mm 的降温效果最好。

2.3 露地高度对管内地表层温度的影响

相同管件直径($d=75\text{ mm}$)情况下,对不同防护措施下 3 种露地高度($h=10, 15, 20\text{ cm}$)的管内地表层温度变化规律进行分析。

图 4 反映了灌溉前后不同露地高度下管内地表层温度随时间的动态变化过程。由图 4 可见,对于灌溉和无灌溉情景,5 种防护措施的内地表层温度日变化过程符合正弦曲线特征,最低点在 06:00,最高

点在 15:00,相同时刻 5 种防护措施的内地表层温度均随管件露地高度的增大而减小。这应该是高温环境下管件露出地面越高,其管身越能遮挡阳光照入管内,同时越能阻挡大气温度从水平向传入管内。无论是灌溉还是无灌溉情景,5 种防护措施之中双管防护在 $h=20\text{ cm}$ 时的管内地表层温度均为最低值,分别为 $39.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $38.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,而管内覆秸秆在 $h=10\text{ cm}$ 时的管内地表层温度均为最高值,分别为 $43.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $41.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对比图 4 可见,与无灌溉相比,5 种防护措施灌溉后,白天时段起到降温作用,夜间时段起到保温作用,其中单管防护措施下 $h=20\text{ cm}$ 的降温效果最好,达到 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,其他防护措施下 $h=20\text{ cm}$ 的温度均低于 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,对于 $h=10\text{ cm}$ 和 15 cm 管件,5 种防护措施的内地表层温度降幅较小,在 $0.8\sim 1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间波动。由此可见,对于灌溉和无灌溉而言,不同防护措施下 3 种管件($h=10, 15, 20\text{ cm}$)中露地高度为 20 cm 的降温效果最好。

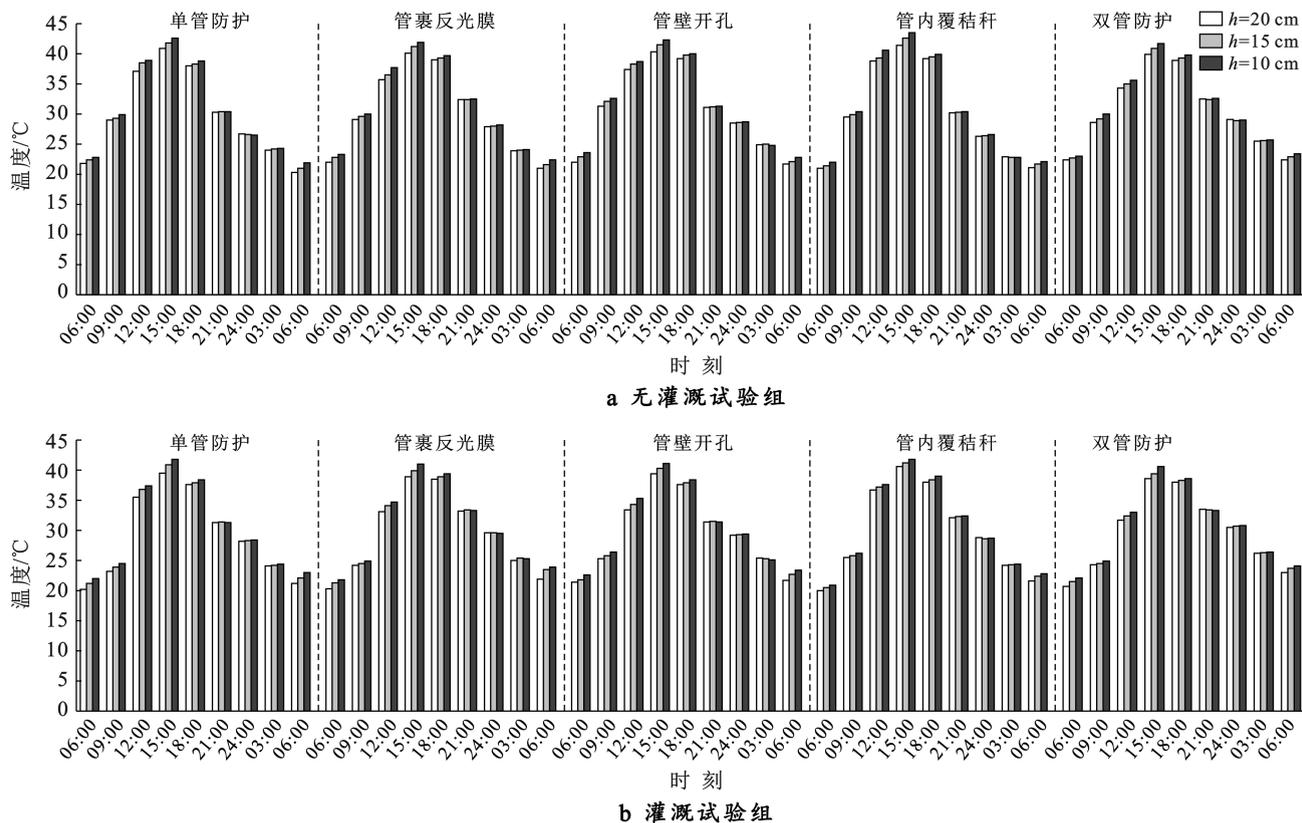


图 4 5 种防护措施下露地高度对管内地表层温度的影响

Fig.4 Effects of above field heights on pipe interior surface layer temperature under five protective measures

2.4 管内地表层温度影响因素分析

通过定性分析可知:防护措施、管件直径和露地高度对管内地表层温度均有影响,另外,管内地表层温度还受流沙地表层温度影响。为进一步探究相关措施参数对管内地表层温度的影响程度,利用 SPSS 27.0 对

试验数据进行方差分析,结果详见表 2。

由表 2 可见,无灌溉条件下,流沙地表层温度、防护措施以及管件直径和露地高度对管内地表层温度均有极显著影响($p<0.01$),4 者的 η_p^2 值(效应量)依次减小,它们对管内地表层温度的影响程度表现出流

沙地表层温度>防护措施>管径直径>露地高度的规律,另外管径直径与露地高度的交互作用对管内地表层温度的影响不显著($p>0.05$)。灌溉条件下,流沙地表层温度和露地高度对管内地表层温度的影响依然表现出极显著水平($p<0.01$),而防护措施对管内地表层温度无显著影响($p>0.05$),管径直径对管内地表层温度有显著影响($p<0.05$),另外管径直径与露地高度的交互作用对管内地表层温度的影响不显著($p>0.05$)。分析原因可能是灌溉引起土壤含水率增大,导致管内土壤热量随着水分运动发生转化,从而改变了防护措施和管径参数对管内地表层温度的影响。综合考虑防护措施和管径参数影响,绘制管

内地表层温度与流沙地表层温度关系曲线(如图 5 所示)。由图 5 可见,管内地表层温度随流沙地表层温度的增大而增大,两者具有良好的线性关系。无灌溉条件下模型的拟合效果优于灌溉条件,这是因为野外试验仅针对 5 种防护措施方案进行了灌溉,而流沙地表层含水率低于管内地表层含水率所致。采用灌溉措施后,5 种防护措施的直线斜率均有不同程度的减小,而截距均有不同程度的增大,说明在高温时段灌溉可以起到降温的作用,而低温时段灌溉可以起到保温的作用。5 种防护措施中双管防护的直线斜率最小,无灌溉时为 0.86,而灌溉后变为 0.78,说明双管防护+灌溉能充分降低管内地表层温度,降温效果最好。

表 2 管内地表层温度影响因素方差分析

Table 2 Analysis of variance of factors influencing surface layer temperature of pipe interior

差异源	无灌溉试验			灌溉试验		
	<i>F</i>	<i>P</i>	η_p^2	<i>F</i>	<i>P</i>	η_p^2
防护措施	6.23	0.00	0.060	0.80	0.52	0.008
管径直径	9.24	0.00	0.045	3.97	0.02	0.020
露地高度	7.31	0.00	0.036	8.36	0.00	0.041
管径直径×露地高度	0.85	0.49	0.009	0.34	0.85	0.003
流沙地表层温度	11 363.34	0.00	0.967	6 135.22	0.00	0.940

注:*F* 是组间方差和组内方差的比值,比值越大相对组间的差异越大;*p* 为显著性, $p<0.05$ 为显著, $p<0.01$ 为极显著; η_p^2 表示效应量,该值越大说明差异越大。

2.5 灌溉前后地表层土壤水热耦合效应

通过分析得出,管径防护+灌溉措施能够有效降低管内地表层温度,5 种防护措施中双管防护的降温效果最好,进一步地,5 种防护措施中采用 $d=110$ mm 和 $h=20$ cm 的管径结构参数防护性能最优。在干旱炎热的沙漠环境中,土壤内水分分布和热量分布是相互联系的,是决定固沙植物健康生长的重要条件,掌握土壤水热耦合效应对于沙漠生态恢复和水资源合理利用具有重要意义。基于此,对表 1 中 5 种防护措施下土壤水热分布数据进行整理,绘制优选方案中不同防护措施、管径直径和露地高度下管内地表层水热日变化曲线(如图 6 所示)。由图 6 可见,不同防护措施和管径结构参数下管内地表层含水率均随时间的延长而逐渐降低,这是由于沙漠区风沙土蒸发强烈,造成地表层水分损失。灌溉条件下地表层水分得到有效补充,土壤含水率明显高于无灌溉试验组,而地表层温度则低于无灌溉试验组。由图 6 可知,在 $d=110$ mm 和 $h=20$ cm 时,在 15:00 时刻,管内地表层温度符合:双管防护<管裹反光膜<管壁开孔<单管防护<管内覆秸秆规律,而 5 种防护措施的地表层湿度规律与温度正好相反,即,双管防护>管裹反光膜>管壁开孔>单管防护>管内覆秸秆,无灌溉条件下 5 种防护措施的地表层温/湿度依次为 38.3 °C/10.3%,

38.6 °C/8.8%, 38.8 °C/8.3%, 39.3 °C/7.0% 和 39.9 °C/6.2%,灌溉情况下依次为 36.7 °C/14.3%, 37.0 °C/12.6%, 37.2 °C/11.4%, 37.4 °C/11.0% 和 38.0 °C/10.3%。由图 6 可知,双管防护措施下,管径直径对管内地表层温湿度均有影响,管径越大,管内地表层温度越低、湿度越高。这应该是低温条件下土壤不易蒸发,利于保墒。灌溉使管内地表层含水率增高、温度降低,以 15:00 为例,灌溉条件下 $d=75,90,110$ mm 管径内地表层温度分别比无灌溉降温 1.3, 1.2, 1.6 °C,而含水率分别增湿 5.6%, 3.7% 和 4.0%。另外,灌溉还会引起蒸发水量增大,06:00 与次日 06:00,无灌溉条件下 $d=75,90,110$ mm 管径内地表层含水率分别减少了 1.3%, 2.4% 和 1.9%,而灌溉条件下它们分别减少了 1.9%, 3.2% 和 4.0%。双管防护措施下(图 6),露地高度对管内地表层温湿度均有影响,露地高度越大,管内地表层温度越低、湿度越高,如 15:00 时刻,无灌溉条件下, $h=10,15,20$ cm 管径内地表层温/湿度分别为 39.9 °C/6.5%, 39.2 °C/7.7% 和 38.3 °C/10.3%,而灌溉条件下,它们分别为 38.1 °C/9.8%, 37.5 °C/12.2%, 36.7 °C/14.3%。另外,由于日蒸发,06:00 与次日 06:00,无灌溉时它们水分分别减少了 3.4%, 2.8% 和 1.9%,灌溉后分别减少了 2.6%, 2.9% 和 4.0%。

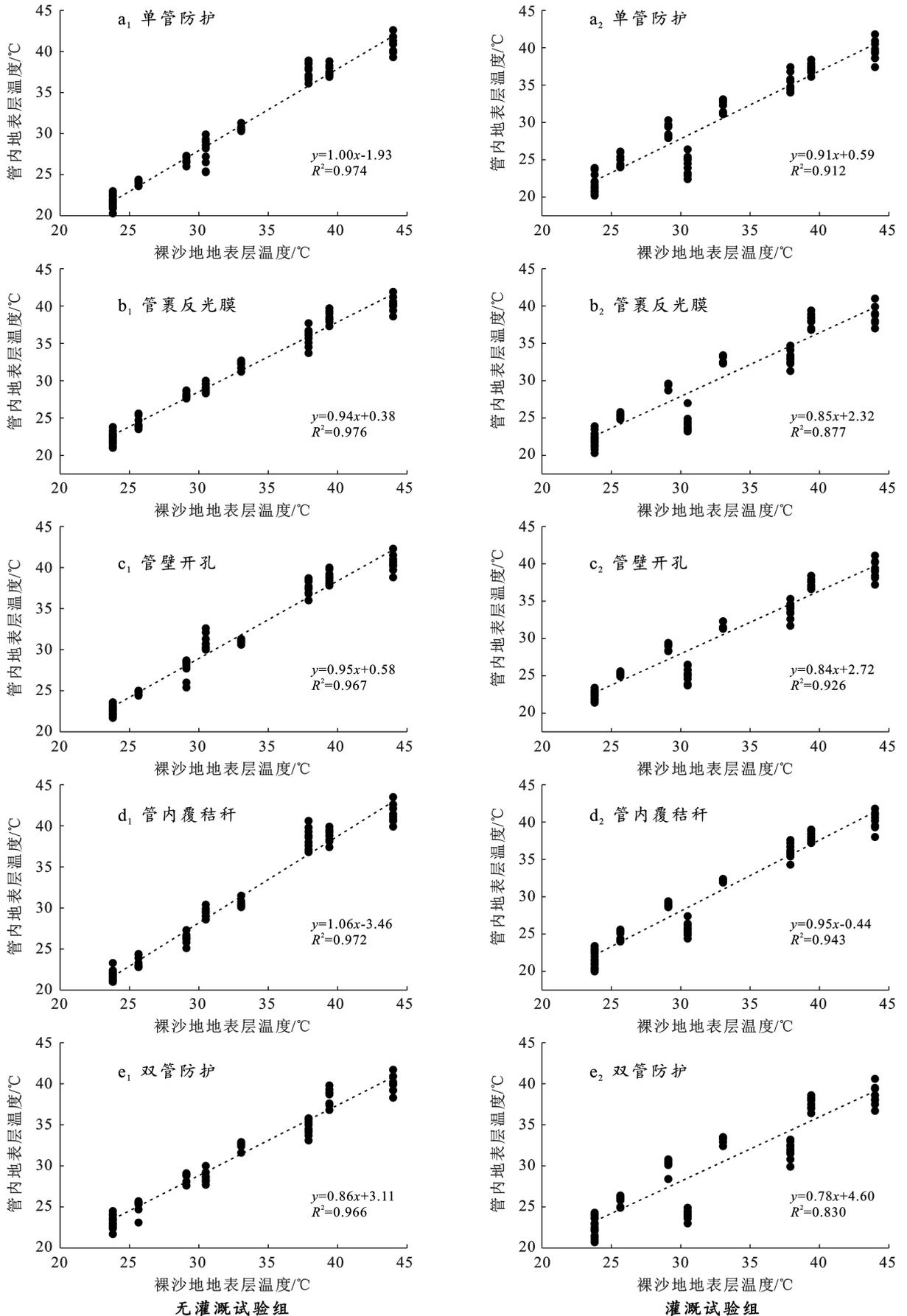


图 5 流沙地表层温度与管内地表层温度相关性

Fig.5 Correlation between surface layer temperature in quicksand and surface layer temperature of pipe interior

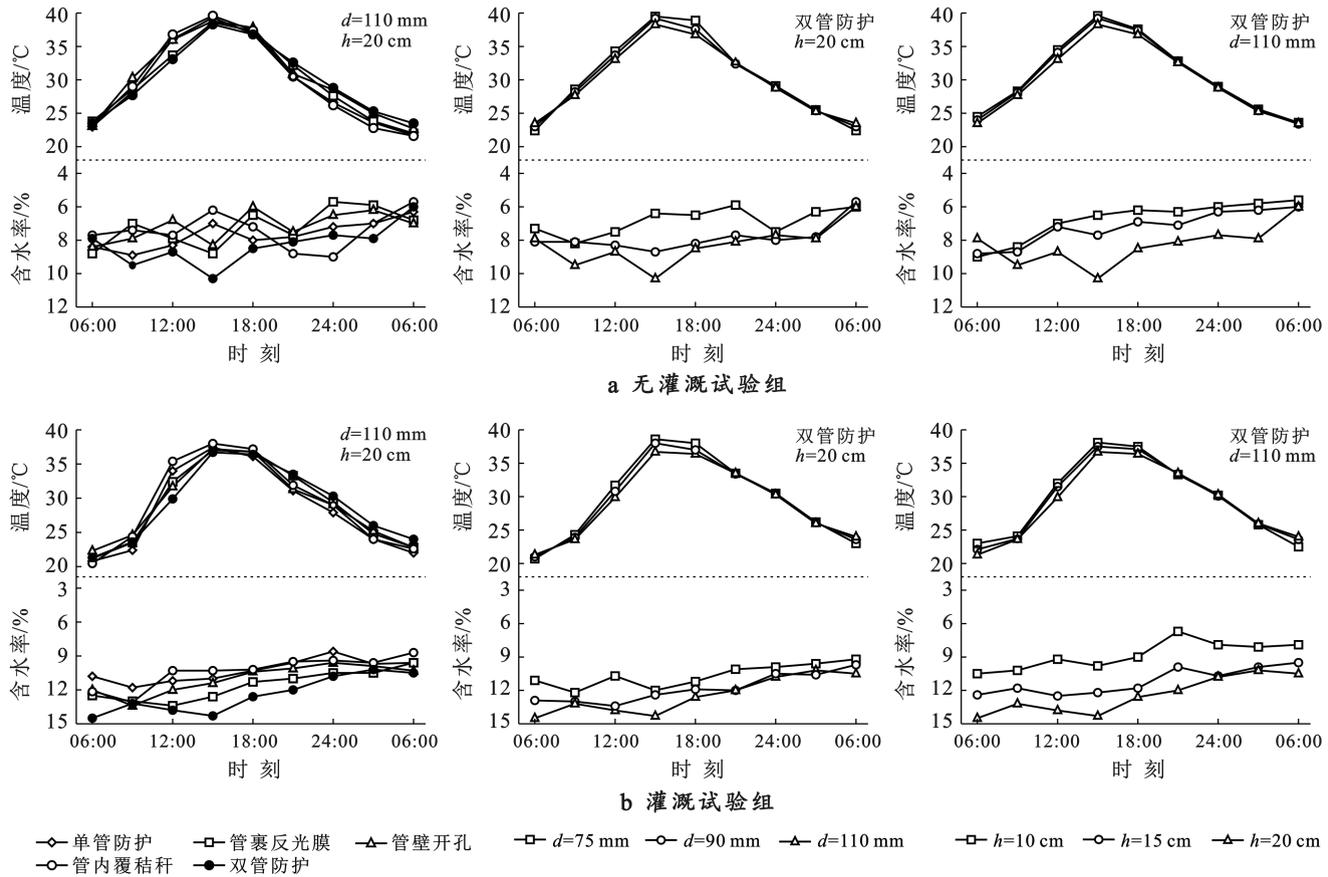


图 6 不同防护措施和管件参数下管内地表层温湿度日变化

Fig.6 Diurnal changes of temperature and humidity of pipe interior surface layer under different protective measures and pipe fitting parameters

3 讨论

近年来,管件防护技术逐渐应用于荒漠植被恢复工程中,该技术取材方便,操作简单,其核心是利用防护管件将固沙植物幼苗套住,通过管件的防护来降低地表层高温对幼苗茎基部的灼伤。本研究在单管防护的基础上,又增设了管裹反光膜、管壁开孔、管内覆秸秆和双管防护等 4 种防护措施,在不同防护措施下分析管件参数和灌溉因子对管内地表层温度和含水率的影响。在流沙地上插入防护管件,其管内地表层温度明显低于流沙地,说明管件防护能够起到降温作用,这一结论与麻浩等^[20]研究结果相一致。5 种防护措施中双管防护的降温效果最好,这为后期双层轴向中空管在荒漠造林工程中的应用提供了理论依据。土壤含水量的大小及其稳定性是决定地表层温度受大气温度影响而波动快慢的关键因素之一,适宜的土壤水、热条件是作物健康生长的重要环境参数^[27-28]。灌溉在增加土壤含水率的同时,与地表层热量存在耦合关系,在白天时段,灌溉能够降低管内地表层温度;在夜间时段,灌溉能够增加管内地表层温度,这对干旱高温沙漠区防护林建设与管护是非常有益的。因

为在沙漠区防护措施一经投入使用,便基本处于固定不可更改模式,而灌溉是可以人为控制的,这为固沙植物有效应对极端干旱高温天气提供了科学预案。

管件直径和露地高度对管内地表层温度有一定影响。从降温角度出发,大直径管件降温效果优于小直径管件,但并不代表管件直径越大越好,这是因为管件直径越大,经济成本越高;另外,当管件直径无限大时,代表着管件的防护降温作用的消失。因此,充分考虑降温效果、经济成本和植物生长等因素,管件直径不应为植物幼苗产生约束为宜,大小大致与冠幅相当。进一步地,对于降温而言,露地高度应越高越好,但露地高度增大,会引起经济成本增多,且管件完全高于植株后,植物光合作用受到影响,不利于植物生长。因此,从降温效果、经济成本和植物生长等角度出发,露地高度不应影响植物光合作用为宜,高度大致与株高相当。本研究中,管件直径 110 mm 和露地高度 20 cm 的管件是降温效果相对较好的管件参数。

近年来有关沙漠区地表层降温技术的研究是有限的,对灌溉节水控温的研究更是处于探索阶段,这一领域还有广泛的研究空间,尤其对引入新材料新技

术更值得被关注。本文所用防护管材为 PVC 管, 该材料隔热性能好, 具有耐老化等性能, 且管件材质轻、施工方便。但考虑到 PVC 管件材料难降解问题, 后续仍需系统研发更经济、更环保、可降解、耐久性较好的沙制管件, 进一步拓展荒漠区植被恢复工程应用, 达到生态、经济、社会效益的统一。

4 结论

(1) 5 种防护措施和流沙地表层温度均在 15:00 达到最大值并以此为分界点, 表现出先递增后递减的正弦曲线变化规律。相比于流沙地, 5 种防护措施均能降低管内地表层温度, 其中双管防护降温效果最好, 其次为管裹反光膜、管壁开孔和单管防护, 管内覆秸秆降温效果最差。

(2) 管件结构参数对管内地表层温度有一定影响。06:00 时刻管内地表层温度随管件直径的增大而增大, 其他时段则随管件直径的增大而降低; 全天时段管内地表层温度随管件露地高度的增大而减小。

(3) 灌溉前流沙地表层温度、防护措施以及管件直径和露地高度对管内地表层温度均有极显著影响, 而灌溉后防护措施的影响表现为不显著。无论灌溉与否, 管件直径与露地高度的交互作用对管内地表层温度的影响不显著, 管内地表层温度与流沙地表层温度具有良好的线性关系。

(4) 与无灌溉相比, 灌溉在白天时段(06:00—21:00)起降温作用, 而夜间时段(21:00—06:00)起保温作用; 管内地表层水热存在耦合效应, 地表层含水率越高, 其温度越低。

综上所述, 对于干旱炎热的沙漠地区, 从降温效果和保持土壤水分的角度考虑, 为固沙植物幼苗生长提供最佳水热环境为目标, 确定适宜的降温技术参数为管径 110 mm, 露地高度 20 cm 的双管防护。该技术参数可巧妙解决高温和干旱复合胁迫对固沙植物幼苗的伤害, 同时也实现了防护管件控温理论的创新, 为风沙防治和生态恢复提供最优保育模式以及新思路和新方法。

[参 考 文 献]

[1] Bestelmeyer B T, Okin G S, Duniway M C, et al. Desertification, land use, and the transformation of global drylands [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2015, 13(1):28-36.

[2] Yang Xiaohui, Zhang Kebin, Jia Baoquan, et al. Desertification assessment in China: an overview [J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 63(2):517-531.

[3] 国家林业局. 中国第五次全国荒漠化和沙化状况公报

[EB/OL]. 国家林业和草原局政府网, (2015-12-29) [2016-05-05]. <http://www.forestry.gov.cn/main/69/content-831684.html>.

- [4] 王涛. 中国防沙治沙实践与沙漠科学发展的 70 年: I. 初创新篇[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(1):1-4.
- [5] 卢琦, 雷加强, 李晓松, 等. 大国治沙: 中国方案与全球范式[J]. *中国科学院院*, 2020, 35(6):656-664.
- [6] Breckle S W, Veste M, Wucherer W. The role of biological soil crusts on desert sand dunes in the Northwestern Negev, Israel [J]. *Springer Berlin Heidelberg*, 2001, 38:357-367.
- [7] 张克存, 屈建军, 鱼燕萍, 等. 中国铁路风沙防治的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(6):573-583.
- [8] Li Xinrong, Zhang Zhishan, Tan Huijuan, et al. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazardeas of northern China: relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert [J]. *Science China*, 2014, 57(5):539-548.
- [9] Zandalinas S I, Mittler R, Balfagón D, et al. Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures [J]. *Physiologia Plantarum*, 2018, 162(1):2-12.
- [10] 王波, 薛源, 潘绒, 等. 梭梭幼苗在高温胁迫适应性建立过程中的细胞死亡特征分析[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(15):5157-5163. DOI:10.13271/j. mpb.019.005157.
- [11] Stephenson N L, Das A J. Height-related changes in forest composition explain increasing tree mortality with height during an extreme drought [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1):1-4.
- [12] 周洁, 杨晓东, 王雅芸, 等. 梭梭和骆驼刺对干旱的适应策略差异[J]. *植物生态学报*, 2022, 46(9):1064-1076.
- [13] 张增志, 杜红梅, 渠永平. 沙漠水科学材料研究综述[J]. *中国材料进展*, 2018, 37(2):81-87, 125.
- [14] 李久生, 栗岩峰, 王军, 等. 微灌在中国: 历史、现状和未来[J]. *水利学报*, 2016, 47(3):372-381.
- [15] 孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 等. 极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素[J]. *环境科学*, 2020, 41(4):1950-1959.
- [16] 杜虎林, 冯起, 石新根, 等. 直插式根灌节水装置设计及应用示例[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(S1):65-71.
- [17] 王海峰, 雷加强, 李生字, 等. 塔里木沙漠公路防护林的温度和湿度效应研究[J]. *科学通报*, 2008, 53(S2):33-42.
- [18] 李火青, 吴新萍, 买买提艾力·买买提依明, 等. 塔克拉玛干沙漠地表浅层土壤热扩散率、温度和热通量计算方法的比较研究[J]. *土壤通报*, 2016, 47(4):805-813.
- [19] 李永康, 王新军, 马燕飞, 等. 基于 Catboost 的 AMSR-2 半经验地表温度降尺度[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(6):1637-1649.

- [16] Ke Zengming, Liu Xiaoli, Ma Lihui, et al. Excavated farmland treated with plastic mulching as a strategy for groundwater conservation and the control of soil salinization [J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(16):3036-3048.
- [17] Evertsz C J G, Mandelbrot B B. *Multifractal measures [M]*. *Chaos & Fractals New Frontiers of Science*, Springer-Verlag, 1992,984.
- [18] Qi Fei, Zhang Ronghua, Liu Xia, et al. Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018,184:45-51.
- [19] Vázquez E V, Miranda J G V, Paz-Ferreiro J. A multifractal approach to characterize cumulative rainfall and tillage effects on soil surface micro-topography and to predict depression storage [J]. *Biogeosciences*, 2010, 7:2989-3004.
- [20] Zhu Qing, Lin Henry. Influences of soil, terrain, and crop growth on soil moisture variation from transect to farm scales [J]. *Geoderma*, 2011,163:45-54.
- [21] Fang Kaikai, Li Huike, Wang Zhikang, et al. Comparative analysis on spatial variability of soil moisture under different land use types in orchard [J]. *Scientia Horticulturae*, 2016,207:65-72.
- [22] Fatholouloumi S, Vaezi A R, Firozjaei M K, et al. Quantifying the effect of surface heterogeneity on soil moisture across regions and surface characteristic [J]. *Journal of Hydrology*, 2021,596:126132.

(上接第 71 页)

- [24] 文勇立,孙静,王永,等.若尔盖沙化草地土壤 pH、水、盐空间异质性研究[C].北京:中国畜牧兽医学学会家畜生态分会第七届全国代表大会暨学术研讨会论文集,2008.
- [25] 周启龙.藏西沙化草地根系分布与土壤理化性质的关系[J].*水土保持通报*,2021,41(1):1-5.
- [26] 李世龙.青藏高原东缘玛曲沙化高寒草地土壤理化性质[J].*中国沙漠*,2022,42(6):44-52.
- [27] 雷玮倩,胡玉福,杨泽鹏,等.垦殖对川西北高寒草地土壤中不同磷组分含量的影响[J].*草业学报*,2019,28(5):36-45.
- [28] 魏志标,柏兆海,马林,等.中国天然草地氮磷流动空间特征[J].*中国农业科学*,2018,51(3):523-534.
- [29] 姜丽娜,马洁,刘建康,等.毛乌素沙地不同植被恢复措施下土壤理化性质空间分布特征[J].*水土保持通报*,2022,42(5):1-7.
- [30] 贾莉洁,李玉会,孙本华,等.不同管理方式对土壤无机磷及其组分的影响[J].*土壤通报*,2013,44(3):612-616.
- [31] 邵丹.若尔盖退化沼泽湿地的土壤磷素组分变化特征研究[D].四川 成都:四川农业大学,2017.
- [32] 吴璐璐,柳小琪,张泽兴,等.吉林省典型土壤磷素形态及有效性[J].*西北农业学报*,2021,30(5):737-745.

(上接第 80 页)

- [20] 麻浩,张桦,马林,等.无灌溉管件防护梭梭荒漠造林新技术及其示范推广[J].*中国科学(生命科学)*,2014,44(3):248-256.
- [21] 王泽,梁燕,阿不都克玉木·米吉提,等.防护条件下梭梭幼苗生长及养分吸收特性[J].*干旱区研究*,2017,34(1):112-118.
- [22] 朱琳,晋强,胡荻.石膏基棉秆复合材料防护管件的制备及防护性能研究[J].*新疆农业大学学报*,2018,41(4):292-297.
- [23] 曹辉,冯勇,晋强.石膏基棉花秸秆矿渣复合砌块的试制研究[J].*新型建筑材料*,2013,40(1):55-56,65.
- [24] 龚建清,方萍,吴慧敏.普通硅酸盐水泥对石膏基混合胶结材的改性研究[J].*湖南大学学报(自然科学版)*,1997,24(6):79-84.
- [25] 范严伟,王延祥,朱鹏程,等.竖管地表滴灌下风沙土稳定入渗率与湿润体估算模型[J].*农业工程学报*,2021,37(7):103-111.
- [26] 范严伟,王延祥,史金红,等.竖管地表滴灌与普通地表滴灌土壤水分运移特性对比试验研究[J].*水土保持学报*,2022,36(6):163-170.
- [27] 王建东,龚时宏,许迪,等.地表滴灌条件下水热耦合迁移数值模拟与验证[J].*农业工程学报*,2010,26(12):66-71.
- [28] Helms T C, Deckard E, Goos R J, et al. Soil moisture, temperature, and drying influence on soybean emergence [J]. *Agron*, 1996,88:662-667.