

陈晓涵, 吴永胜, 海春兴. 毛乌素沙地南缘固沙灌丛下地表凝结水特征[J]. 中国沙漠, 2023, 43(1): 83–95.

毛乌素沙地南缘固沙灌丛下地表凝结水特征

陈晓涵, 吴永胜, 海春兴

(内蒙古师范大学 地理科学学院/蒙古高原气候变化与区域响应自治区高等学校重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要: 尽管凝结水在干旱生态系统中所发挥的重要作用已被广泛关注, 但对其在固沙灌丛下时空变化特征的研究仍然比较薄弱。为探明固沙灌丛对地表凝结水的影响, 在毛乌素沙地南缘沙区选择3种典型固沙灌丛(沙柳 *Salix psammophila*、柠条 *Caragana korshinskii* 和油蒿 *Artemisia ordosica*), 以无固沙灌丛影响的裸沙作为对照, 用微型蒸渗仪测定了固沙灌丛下不同位置(根部、1/2冠幅和外缘)和不同方向(东、南、西、北)上地表凝结水的形成和蒸发特征。结果表明: (1)与对照相比, 固沙灌丛的存在显著降低了地表凝结水量, 沙柳、油蒿和柠条灌丛下凝结水量分别降低了29%、32%和33%; (2)不同类型固沙灌丛下地表凝结水量由里向外均呈显著增加的趋势, 但不同方向上地表凝结水量差异不显著; (3)固沙灌丛的存在减缓了凝结水的形成和蒸发过程, 即凝结水自19:00开始形成, 到次日08:00基本结束, 至13:00—15:00蒸发殆尽, 其形成过程整体上表现出增加—平缓—增加的趋势, 柠条和油蒿灌丛下地表凝结水在03:00—05:00甚至有少量蒸发, 而蒸发过程呈稳定下降趋势; (4)凝结水的形成过程与空气相对湿度显著正相关, 与空气温度和地表温度显著负相关。固沙灌丛通过拦截太阳辐射来缓冲地表温度变化以减缓水分凝结和蒸发过程。

关键词: 凝结水; 固沙灌丛; 蒸发; 毛乌素沙地; 干旱生态系统

文章编号: 1000-694X(2023)01-083-13

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00079

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

0 引言

土壤凝结水指地表温度达到露点时, 大气和土壤孔隙中的水汽由气态水凝结而成的液态水^[1]。凝结水对个体高大的维管束植物直接利用价值有限^[2], 却是干旱生态系统微生物、藻类、地衣、苔藓和昆虫等微小生物体和浅根植物赖以生存的必要水分来源^[3-8]。地表日凝结水量虽然不多, 但形成十分普遍, 且因其累积量相当可观而被广泛关注。凝结水的累积量在同一地区年降水量中所占的比重最高可达26%^[9], 是干旱地区除降雨之外最主要的水分补给来源。因此, 摸清凝结水的时空分布特征对全面而深入地了解区域水分循环和地表生物地球化学循环过程具有重要的意义。在水分极度匮乏的干旱沙区, 相关研究显得尤为必要。

由于地表凝结水的普遍性和重要性, 对其形成和蒸发过程的研究也引起了国内外学者的广泛关

注^[10-18], 相关研究也集中在凝结水的时空差异^[19-20]及其影响因素^[3, 21-23]等方面。Kidron^[10]采用布板法, 选择表面光滑、粗糙的玻璃和颜色深浅不同的鹅卵石作为凝结水收集表面, 通过改变放置位置和遮阴条件等处理, 研究了凝结水的形成过程, 发现下垫面性质、大小、位置、遮阴条件都会影响凝结水的形成, 并指出表面光滑、面积较大、距地面较高等处理均会增加地表凝结水量, 而遮阴、靠近障碍物等处理会降低地表凝结水量。土壤作为自然条件下水分凝结的表面, 性质差异及有无结皮覆盖也会对凝结水的形成过程产生重要的影响^[24-25]。干燥的土壤导热率更低, 地面不易从深层土壤获得热量, 导致地表温度迅速下降^[25], 并且干燥的土壤在夜间温度降低时对空气中的水分吸附作用更强^[26], 有利于凝结水形成。对裸沙和不同类型生物土壤结皮覆盖地表凝结水形成和蒸发特征的观测结果表明, 与裸沙相比, 生物土壤结皮的覆盖显著增加了地表凝结

收稿日期: 2022-04-08; 改回日期: 2022-05-11

资助项目: 国家自然科学基金项目(42061017); 内蒙古师范大学高层次人才科研启动经费项目(2020YJRC006); 内蒙古自治区科技计划项目(2022YFDZ0036); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2022MS04002)

作者简介: 陈晓涵(1998—), 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 硕士研究生, 主要研究方向为干旱区地理。E-mail: 401129610@qq.com

通信作者: 吴永胜(E-mail: yswuwork@126.com)

水量,且生物土壤结皮表面凝结水量随着结皮发育程度的增加而增加^[14,18,27-28]。除此之外,地表凝结水的时空差异与气象条件的变化密切相关,风速、空气温度、地表温度、大气地表温度差的变化均对地表凝结水的形成过程产生重要的影响^[18,22,29]。

除下垫面条件和气象条件,海拔^[21]和地形起伏^[3,23]也会对地表凝结水的形成过程产生重要的影响。随着海拔增加,地表凝结水量增加^[21]。地形起伏越大,即坡度越大,凝结水量越小^[3]。西坡和北坡凝结水量较高,而南坡和东坡凝结水量较低。除地形起伏等空间差异对地表凝结水的形成过程产生影响之外,植物群落的特征也对地表凝结水的形成过程产生重要的影响。植物高度会影响地表凝结水的形成。对科尔沁沙地不同类型植被对凝结水形成过程的研究结果表明,与高大的樟子松群落相比,农田群落形成的凝结水量更高,即低矮的植物群落更有利于地表凝结水的形成^[30]。对毛乌素沙地植物群落对地表凝结水量影响的研究表明,臭柏群落地表凝结水量最大,油蒿群落次之,裸沙最少,沙地植被的覆盖改变了近地面空气温湿度,有利于地表凝结水的形成^[31]。此外,植被的生长状态也会影响凝结水的形成。凝结水量会随着农作物的生长而增加,而在农作物收获后,凝结水量迅速减少^[32]。沙坡头地区人工固沙灌丛区地表凝结水形成特征的研究表明,灌木林会拦截空气中的水汽向下运移,导致冠层下地表凝结水量的减少^[13,19],且不同类型固沙植物冠层下地表凝结水量有所不同,甚至在同一个植物群落不同高度上地表凝结水也表现出一定的差异,即随着垂直高度的增加,凝结水量增加^[13]。显然,植物类型和形态特征的差异也是影响地表凝结水时空分布差异的重要因素,但相关研究目前仍然较为薄弱。

毛乌素沙地是中国四大沙地之一,是多层次的生态过渡带^[33]。随着近几十年的防沙治沙和植被生态修复,沙丘表面广泛发育了人工固沙植被^[34],被誉为“灌木的王国”。随着相关研究的不断深入,该地区地表凝结水形成和蒸发过程的相关研究也引起了广泛关注,但相关研究结果多局限在不同类型地表凝结水的形成规律^[20]、水汽来源^[35]、影响因素^[18,31,36-38]及生态效应^[16,39-43]等方面,而有关不同类型固沙灌丛影响下地表凝结水形成和蒸发过程时空差异的研究仍缺乏系统的报道,研究现状与该地区广泛分布的人工固沙灌丛和普遍发生的水分凝

结现象相比是极不对称的。为此,本研究选择毛乌素沙地南缘沙区不同类型的人工固沙灌丛,观测固沙灌丛影响下地表凝结水的形成和蒸发过程,分析地表凝结水与气象因子之间的关系,探明固沙灌丛下地表凝结水的时空变化规律及其原因,为准确评价固沙灌丛对地表微环境的影响提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于毛乌素沙地南缘(图1),是鄂尔多斯高原向黄土高原的过渡区,行政区划上隶属于陕西省榆林市靖边县海则滩乡(37°46'N、108°53'E,海拔1300m),属于温带大陆性半干旱季风气候,表现为昼夜温差较大、雨热同期的特点。研究区多年平均气温8.4℃,多年平均降水量381.4mm,集中在7—9月。降水变率较大,最大降水量达744.6mm(1964年),最小降水量仅205mm(1965年)。研究区多年平均蒸发量为2484.5mm,为多年平均降水量的6.32倍^[44]。研究区地表景观呈流动、半固定、固定沙丘和湖盆滩地相间的分布格局,沙丘沉积物机械组成以细沙为主,中沙次之^[45]。研究区主要的天然植物有油蒿(*Artemisia ordosica*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、软毛虫实(*Corispermum puberulum*)、沙竹(*Psammochloa villosa*)等。随着近几十年的飞播造林和植被生态修复,研究区植被盖度显著提高,沙丘表面定植了大面积的人工植被,主要有油蒿、沙柳(*Salix psammophlia*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、小叶杨(*Populus simonii*)、羊柴(*Hedysarum mongolicum*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)和沙地柏(*Sabina vulgaris*)等^[44]。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

设置样地时,在研究区选择植被发育良好、地形差异较小的典型样地,选择具有代表性的柠条、沙柳和油蒿各3株作为重复。所选的目标植物空间距离和形态结构尽量接近,尚不能满足要求时可采取适度的修剪等处理,使同一种植物不同个体之间的差异尽量接近。所选目标植物的基本特征见表1。确定目标灌丛植物后,在每株灌丛下分别设置东(E)、南(S)、西(W)和北(N)4个方向,并在每个方向上设置灌木根部、1/2的冠幅和冠幅外缘3个观

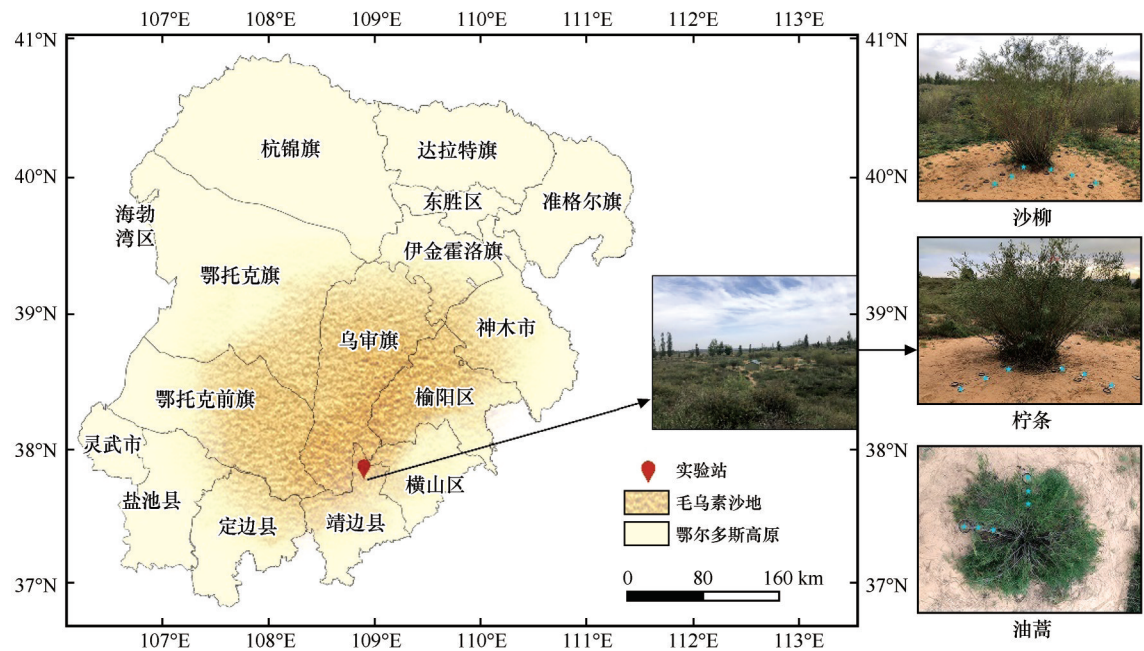


图 1 研究区位置和样地布设

Fig.1 Schematic diagram of the geographical location of the study area and plot layout

表 1 研究区不同类型固沙灌木丛基本特征
Table 1 Basic characteristics of different types of sand-fix shrubs in the study area

指 标	灌木丛类型		
	沙柳	柠条	油蒿
平均直径/cm	333±9	299±16	98±4
平均高度/cm	259±6	216±10	50±2
平均一级枝条数/枝	119±9	77±2	47±2
平均投影面积/m ²	8.7±0.5	7.2±1.0	0.8±0.1
平均一级枝条直径/mm	9.4±0.8	14.7±0.2	4.8±0.2
一级枝条与地面夹角/(°)	55±2	55±1	33±1

测点,并布设自制微型蒸渗仪(图 1 右)。另外,在观测点附近,选择无固沙灌木丛影响的空旷区域,设置 3 个裸沙样品作为对照。为降低因样品过多、测量时间过长而导致的试验误差,在各目标植物观测点中心位置搭建简易帐篷,降低样品搬运距离的同时避免微风对观测结果产生的影响。此外,制作托盘(可容纳 12~15 个样品),以缩短在样品搬运过程中所需的时间。

地表凝结水的观测至今没有国际通用的方法。考虑当前微型蒸渗仪因其测量结果可靠且能够连续观测等优点,本研究也采用该方法。本研究所采用的微型蒸渗仪由直径 7.5 cm、高 10 cm 的 PVC 管制成,底部采用 250 目的金属筛网封底,内填裸沙

(过 50 目筛滤出细根和枯落物等),保证蒸渗仪中的裸沙不会有外漏,且与外界保持水汽交换。蒸渗仪内填埋裸沙后,将其置于预先埋设好的直径为 9 cm 的外管内。布设蒸渗仪时,外管上边缘高出地面 1 cm,内管土面与周边地表齐平,目的是尽量避免周边风沙颗粒跃入内置蒸渗仪而对观测结果产生影响。观测期间,如果遇到降雨事件,则停止观测。

1.2.2 测定方法

试验观测在 2021 年 7—9 月展开。地表凝结水的观测采用精度为 0.01 g 的电子天平,通过早晚(19:00,07:00)各称重 1 次蒸渗仪的方法实现,即两次称重的质量差值视为当地地表凝结水形成的量。称重时,用干毛巾把蒸渗仪周边擦拭干净,以免蒸渗仪底部粘有沙粒等细颗粒物和侧壁上形成的凝结水对观测结果的影响。为探明凝结水的形成和蒸发过程,本试验选择 2021 年 9 月 27—29 日对蒸渗仪重量变化进行加密观测,即每隔 2 h 对其测定 1 次。同时用精度为 0.5 °C 的直角温度计测量各观测点 0~5 cm 层土壤温度。同时通过自动气象站(距观测点约 1 km)获取观测期间地表温度、空气温度、相对湿度和风速等逐小时气象数据。

1.2.3 分析方法

地表凝结水量用蒸渗仪质量之差表示。蒸渗仪质量增加时视为形成了凝结水,质量减少时视为水分从地表蒸发。最后将以质量表示的凝结水量

转换成以高度表示的凝结水量,具体转换公式为:

$$H = 10m/\rho\pi r^2$$

式中: H 为凝结水量(mm); m 为微型蒸渗仪的质量差(g); r 为微型蒸渗仪半径(cm); ρ 为水的密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)。

对不同类型灌丛的不同方向和不同位置日凝结水数据进行平均($n=36$),作为该种灌丛下地表日凝结水量。求同一方向不同位置凝结水观测结果的平均值($n=9$),作为该方向的地表凝结水量。求同一位置不同方向上凝结水观测结果的平均值($n=12$),作为该位置的地表凝结水量。文中所有数据均以平均值 \pm 标准误差表示。不同类型固沙灌丛影响下地表凝结水总量之间的差异、同一类型灌丛下不同位置 and 不同方向之间的差异采用单因素方差分析方法,并经过LSD检验;灌丛类型、不同方向和不同位置对地表凝结水量的影响采用多因素方差分析方法;地表凝结水量与气象因素之间的关系分析采用Pearson相关分析法。所有原始数据处理使

用Microsoft Excel软件,制图用Origin 2018软件,统计分析采用SPSS Statistics 25软件。

2 结果与分析

2.1 地表凝结水的日变化特征

试验期间共观测了23次凝结水。除降雨天气以外,几乎每天都能观测到凝结水,且对照和固沙灌丛下地表日凝结水量之间的差异较大(图2)。地表日均凝结水量和累计凝结水量之间也表现出较大差异,其值由大到小依次表现为对照0.127 mm和2.921 mm,沙柳0.090 mm和2.074 mm,油蒿0.087 mm和1.991 mm,柠条0.085 mm和1.961 mm(图3)。与对照相比,沙柳、油蒿和柠条下地表凝结水量分别减少了29%、32%和33%。方差分析结果表明,对照处理日均凝结水量和累计凝结水量均显著高于固沙灌丛影响区,但不同类型固沙灌丛之间地表日均凝结水量和累积凝结水量之间差异不显著(图3)。

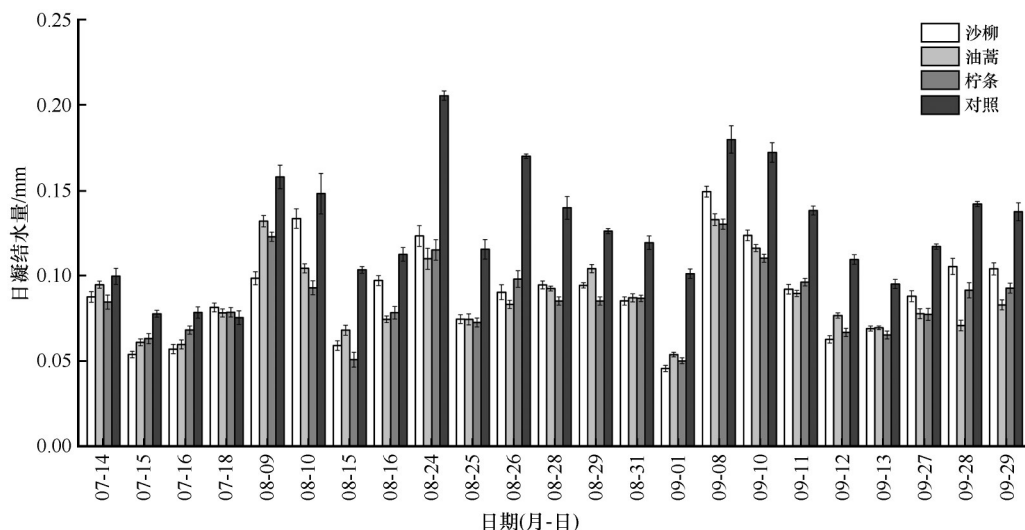


图2 观测期间不同类型固沙灌丛及对照日凝结水量的变化

Fig.2 Variation of daily dew of different types of sand-fixing shrubs and control group during the experimental period

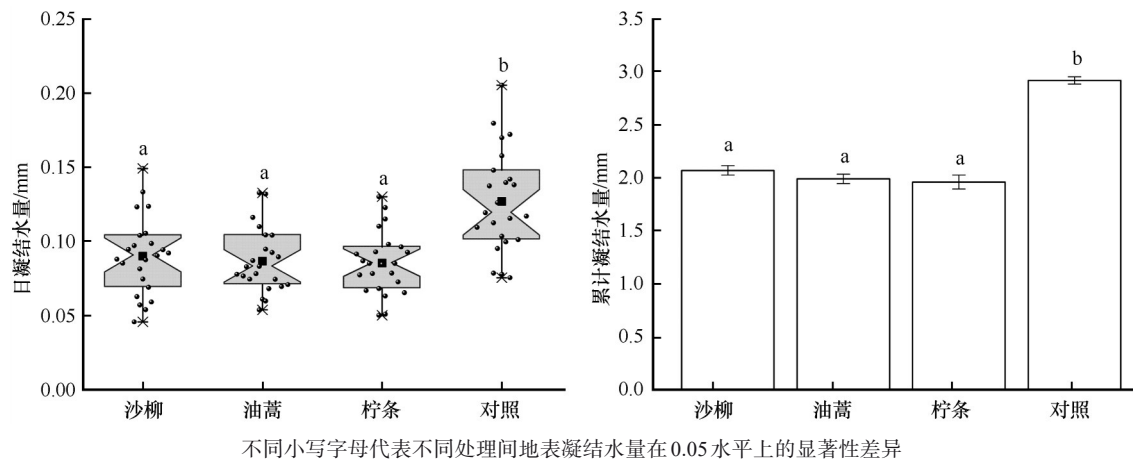
2.2 固沙灌丛下不同位置地表凝结水的变化特征

不同类型固沙灌丛影响下,地表凝结水的时空分布特征有差异(图4),地表凝结水整体上从灌丛根部向灌丛外围呈增加趋势,即靠近灌丛根部区地表凝结水量最少,1/2冠幅处次之,灌丛冠幅外缘地表凝结水量最大(图4)。在不同方向上,地表凝结水也表现出一定的差异,整体上表现为东侧凝结水量偏小,西侧和南侧凝结水量相对较大(图5)。进一步分析结果表明,各固沙灌丛下不同位置地表累

计凝结水量之间差异显著($P<0.05$),而不同方向上地表累计凝结水量之间的差异不显著(图6)。多因素方差分析结果表明,灌丛类型和不同方向对地表凝结水量的影响较有限,而灌丛下不同位置对地表凝结水量的影响显著($P<0.05$,表2)。

2.3 地表凝结水的形成和蒸发过程

凝结水自19:00开始形成,到次日08:00时达到最高点,随后开始蒸发(图7)。灌丛植物的存在减



不同小写字母代表不同处理间地表凝结水量在 0.05 水平上的显著性差异

图 3 观测期间不同类型固沙灌木及对照日均凝结水量和累计凝结水量

Fig.3 Variation of daily average dew amount and cumulative dew amount of different types of sand-fixing shrubs and control group during the experimental period

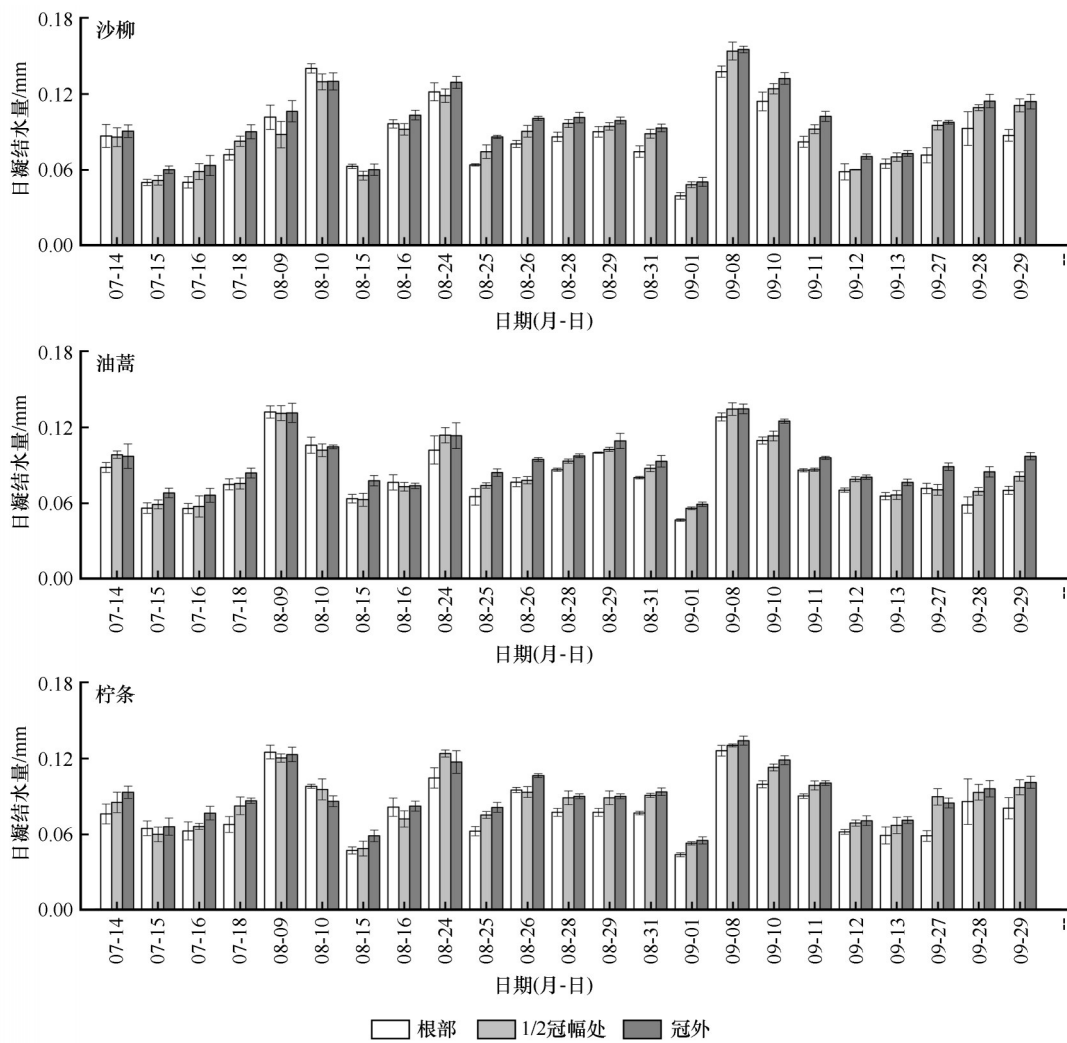


图 4 不同类型固沙灌木影响下地表凝结水在不同位置上的日变化

Fig.4 Diurnal variation of surface dew at different locations under the influence of different sand-fixing shrubs

少了地表凝结水量,改变了水分凝结过程。对照地表凝结水形成速率快,固沙灌木影响下地表凝结水的形成过程变缓,且不同类型固沙灌木下地表凝结水的形成和蒸发过程有差异。凝结水自 19:00 开始

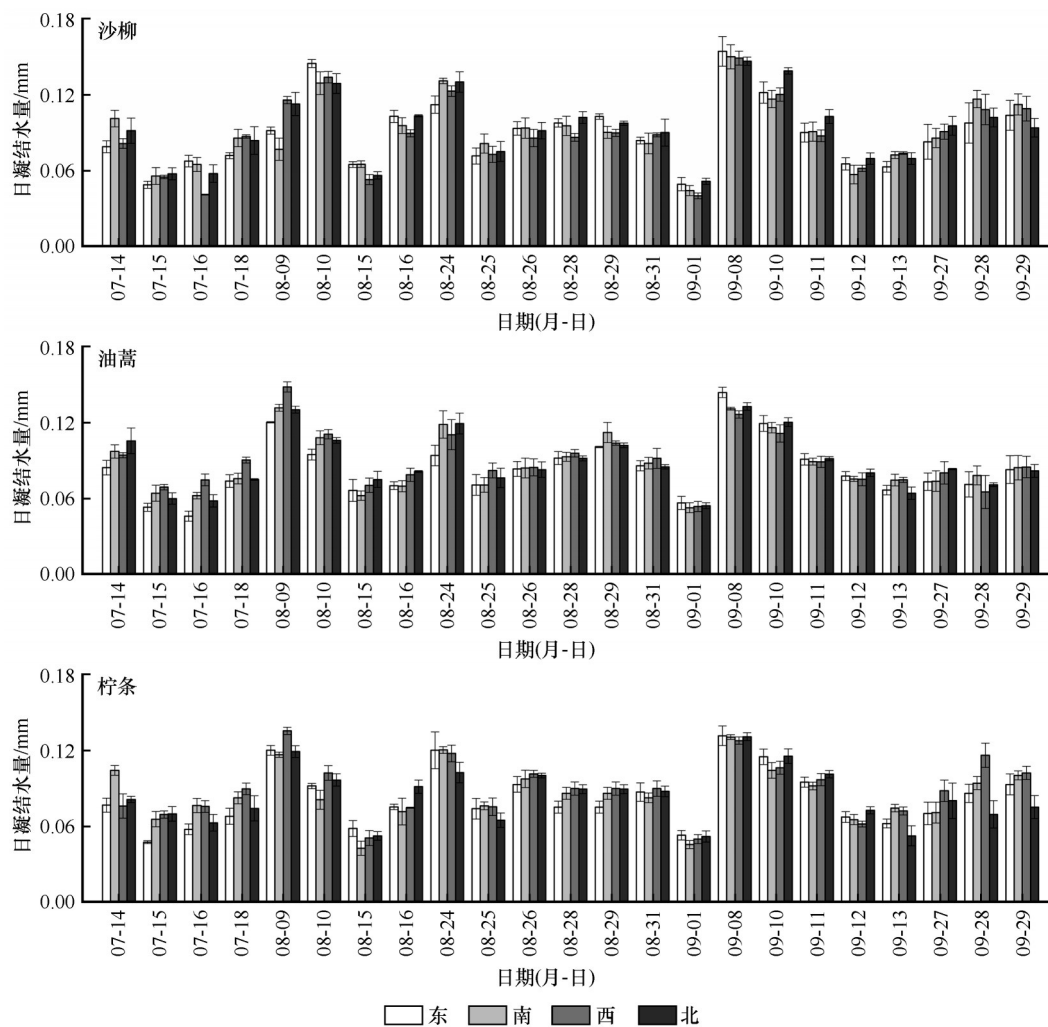
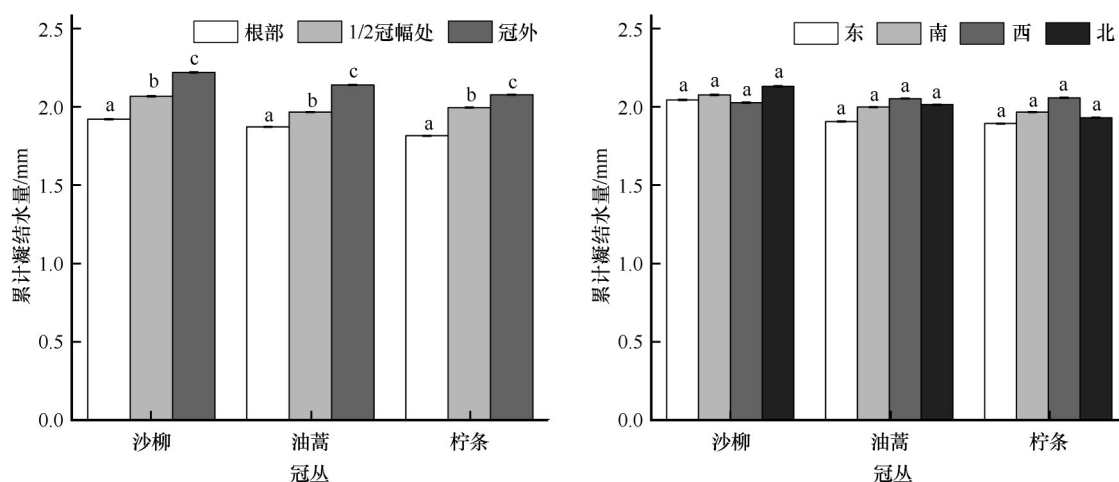


图5 不同类型固沙灌丛影响下地表凝结水在不同方向上的日变化

Fig.5 Diurnal variation of surface dew in different directions under the influence of different sand-fixing shrubs



不同小写字母代表地表凝结水总量在0.05水平上的显著性差异,相同小写字母代表地表凝结水总量在0.05水平上差异不显著

图6 固沙灌丛影响下地表累计凝结水量在不同位置和方向上的变化

Fig.6 Variation of cumulative surface dew in different sand locations and directions under the influence of different types of sand-fixing shrubs

表 2 灌丛类型、方向、位置及其交互作用对地表凝结水影响的多因素方差分析结果

Table 2 Results of multivariate analysis of variance on the effects of shrub types, directions, locations and their interactions on surface dew

项目	自由度(df)	F	P值
灌丛类型	2	2.665	0.070
方向	3	1.137	0.333
位置	2	15.723	0.000
灌丛类型×方向	6	0.484	0.820
灌丛类型×位置	4	0.193	0.942
方向×位置	6	0.218	0.971
灌丛类型×方向×位置	12	0.133	1.000

形成,形成速率表现为对照处理最大,柠条和沙柳次之,油蒿最小;在 23:00—01:00 时,地表凝结水的形成过程变缓,与对照处理相比,固沙灌丛下地表凝结水的形成速率明显降低,不同类型固沙灌丛下地表凝结水的形成速率表现为沙柳>柠条>油蒿;从 01:00 开始,地表凝结水形成速率加快,至 03:00—05:00 时,各样地地表凝结水的形成过程的差异进一步加大,即除对照处理和沙柳样地地表凝结水继续形成以外,柠条和油蒿样地地表凝结水甚至还有少

量蒸发且油蒿的地表蒸发量略高于柠条;自 05:00 开始,地表凝结水继续加快形成,至 07:00—08:00 时,各样地地表凝结水量达到其峰值。自 08:00 开始,夜间形成的凝结水开始蒸发。在 08:00—10:00 期间,对照处理地表凝结水蒸发速率最大,沙柳与柠条居中,而油蒿蒸发速率最小,夜间形成的地表凝结水持续至 13:00—15:00 时基本蒸发殆尽。与对照相比,固沙灌丛影响下,地表凝结水的形成和蒸发过程变得缓慢,表明固沙灌丛的存在一定程度上减缓了水分凝结和蒸发过程。

2.4 地表微气象因子的变化及其与凝结水形成和蒸发过程之间的关系

固沙灌丛影响下不同位置 and 不同方向上地表温度表现出一定差异(图 8)。在夜间,沙柳和柠条下不同位置地表温度基本表现为由根部到冠幅外缘递减,油蒿下不同位置地表温度基本表现为根部>冠幅外缘>冠幅 1/2 处;午时,油蒿和柠条下不同位置地表温度表现为由根部到冠幅外缘递增,沙柳灌丛下不同位置地表温度表现为冠幅 1/2 处>冠幅外缘>根部;而在不同方向上地表温度则波动较大,没有呈现出明显的规律。

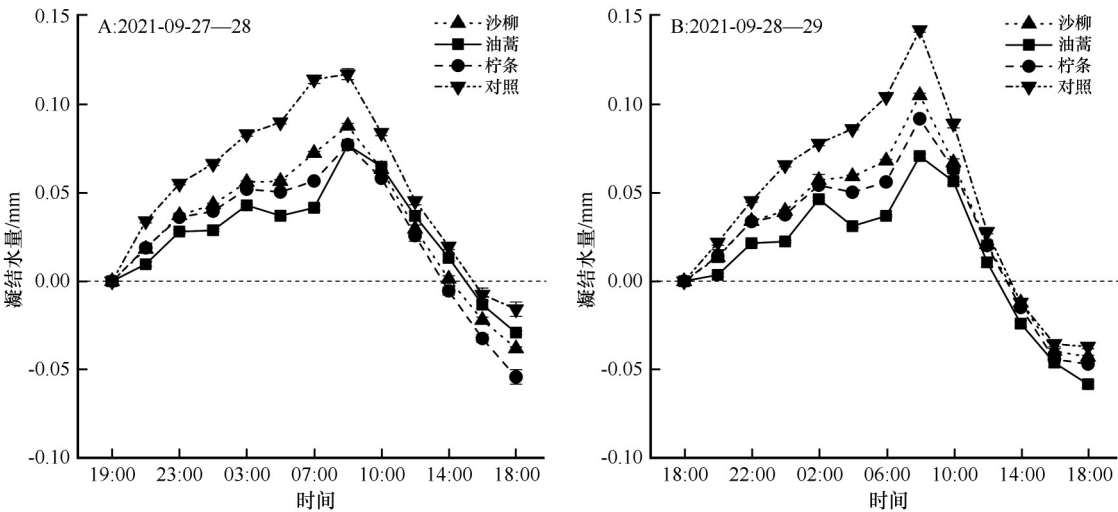


图 7 对照及不同类型固沙灌丛影响下地表凝结水的形成和蒸发过程
Fig.7 Deposition and evaporation process of surface dew under the influence of control group and different types of sand-fixing shrubs

地表凝结水的形成、蒸发与大气温度、对照地表温度呈显著负相关关系,与空气相对湿度和空气地表温度差呈显著正相关关系,与风速之间的相关性不显著(表 3)。夜间空气温度开始降低,到次日 06:00—07:00 时达到最低,不同类型固沙灌丛下地

表凝结水量开始增加,到次日 08:00 左右达到最大。随着太阳辐射的增加,空气温度开始升高,夜间形成的地表凝结水开始蒸发(图 9)。与空气温度相比,空气相对湿度的变化趋势波动较大,自 19:00 开始空气相对湿度增加,凝结水开始形成,到凌晨

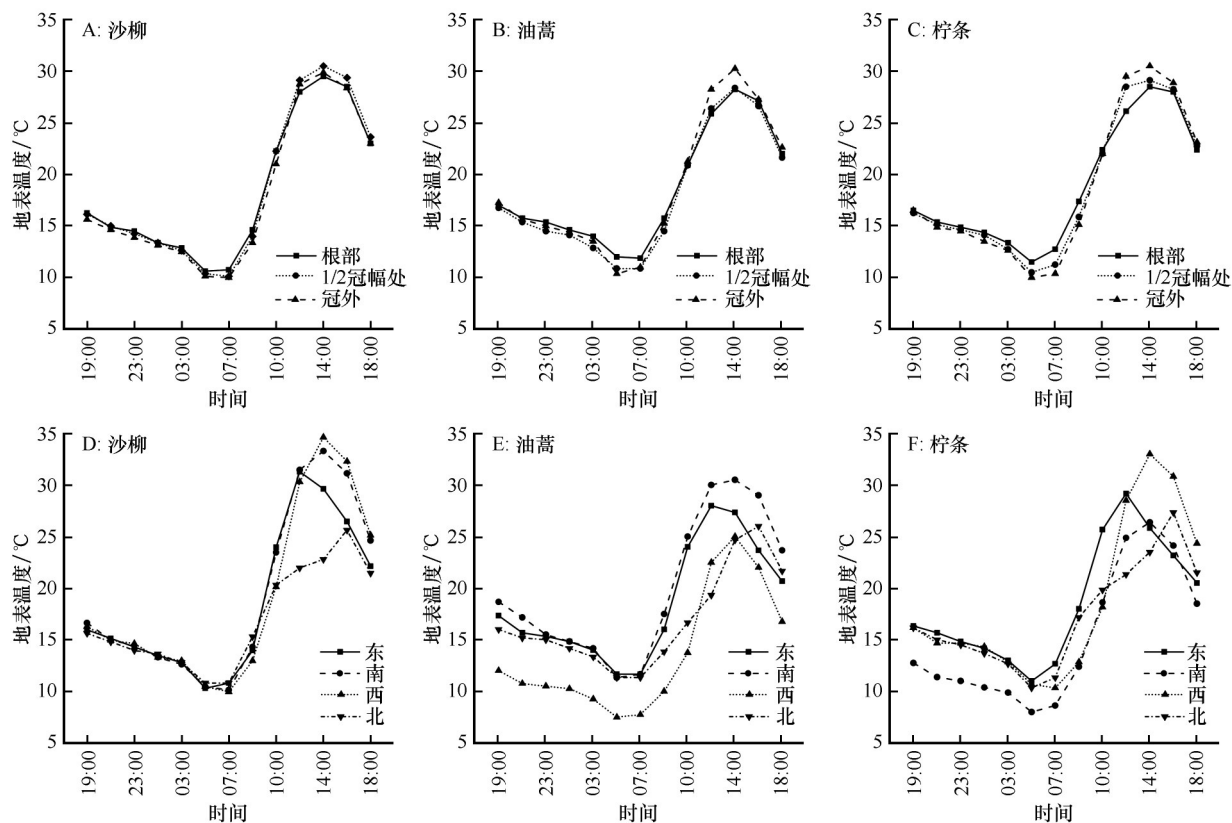


图8 不同类型固沙灌丛下不同位置(A~C)和方向(D~F)上地表温度的变化

Fig.8 Variations of surface temperature at different locations (A~C) and directions (D~F) under different types of sand-fixing shrubs

表3 地表凝结水量与气象因子之间的相关性分析结果

Table 3 Results of correlation analysis between dew amount and meteorological factors

气象因子	对照凝结水量	沙柳凝结水量	柠条凝结水量	油蒿凝结水量
大气温度	-0.783**	-0.800**	-0.786**	-0.743**
相对湿度	0.803**	0.786**	0.763**	0.702**
风速	-0.143	-0.131	-0.095	-0.019
对照地表温度	-0.852**	-0.861**	-0.845**	-0.778**
空气地表温度差	0.803**	0.801**	0.785**	0.699**

**表示在 0.01 水平上的显著性(双尾)。

01:00—02:00 和 04:00—05:00 空气相对湿度出现降低的现象,地表凝结水量也随之下落,至 07:00 左右空气相对湿度达到其最大值,随后开始迅速降低,地表形成的凝结水也开始蒸发。地表温度的变化趋势与空气温度的变化趋势基本同步,19:00 开始地表温度降低,到次日 06:00 时,地表温度达到其最小值,凝结水也达到其最大值。随着地表温度的增加,夜间形成的凝结水开始蒸发。凝结水形成过程与风速变化之间的关系不明显。空气地表温度差

与地表凝结水量变化之间的分析结果表明,空气地表温度差与凝结水的变化趋势基本一致,但前者变化比后者略提前。对照处理及不同类型固沙灌丛下地表温度的监测结果表明,对照处理地表温度始终高于固沙灌丛影响区,且白天不同类型固沙灌丛影响下地表温度由高到低依次表现为沙柳、柠条和油蒿,夜间油蒿样地地表温度则高于其他固沙灌丛影响区。在凝结水的形成和蒸发过程中,与对照相比,固沙灌丛区地表温度与空气温度之间的差异在白天减小,在夜间略微增大。

3 讨论

3.1 固沙灌丛对地表凝结水形成和蒸发的影响

凝结水是干旱缺水地区除降雨之外最主要的水分补给来源^[11]。凝结水的来源包括近地面空气中的水汽、土壤中的水汽和植物周围呼吸或蒸腾出的水汽^[31]。本研究发现,与对照相比,固沙灌丛的存在降低了灌丛下地表凝结水量(图3),研究结果与 Pan 等^[13]在沙坡头地区的研究结果基本一致。由

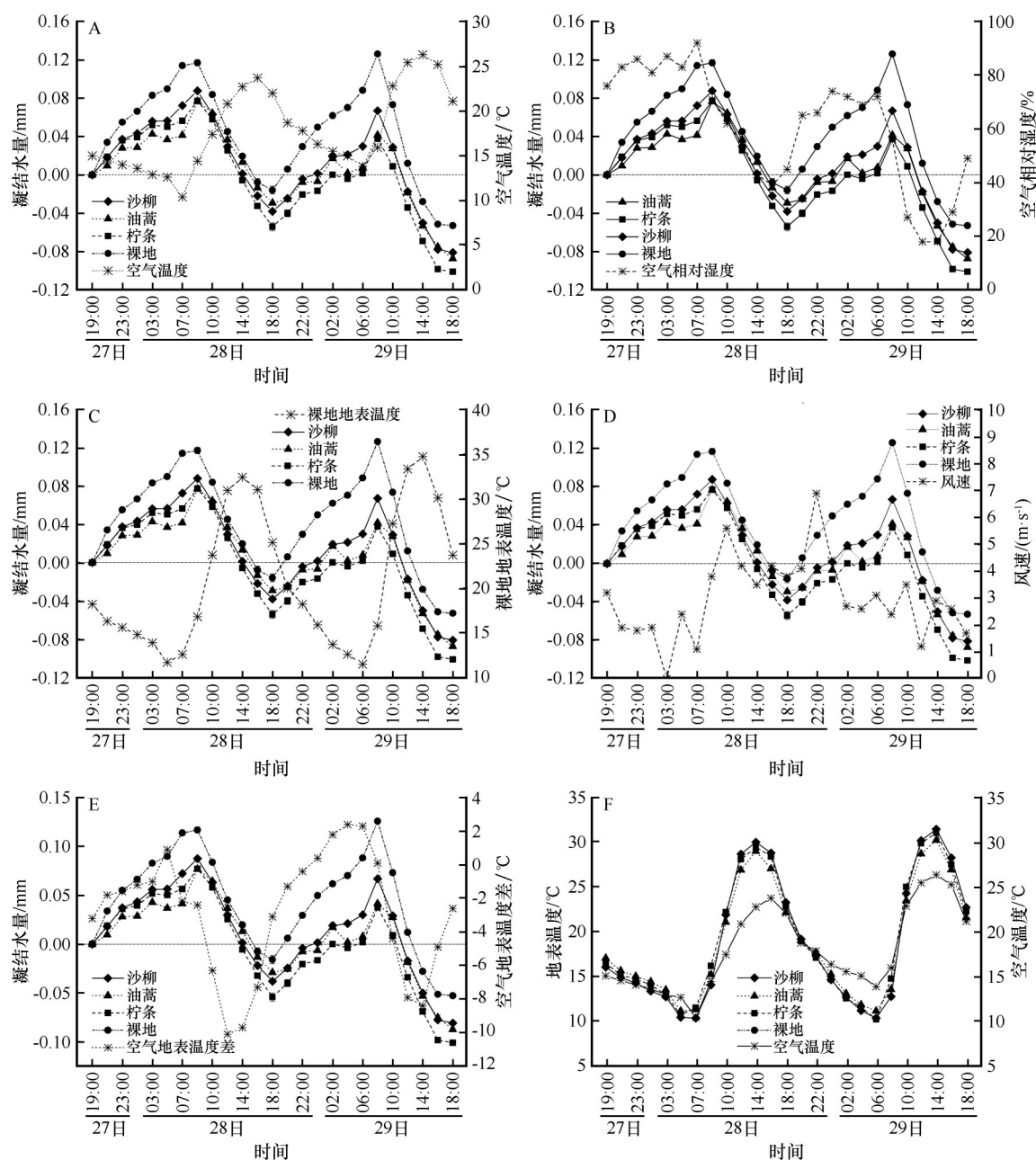


图9 凝结水的形成和蒸发过程与气象因子之间的关系(A~E依次代表凝结水的形成和蒸发过程与空气温度、空气相对湿度、对照地表温度、风速和空气地表温度差之间的关系;F代表空气和地表温度的变化。2021年9月27—29日观测)

Fig.9 The relationship between the formation and evaporation process of dew and meteorological factors. A~E represent the relationship between dew deposition and evaporation process with air temperature, air relative humidity, control group surface temperature, wind speed and air surface temperature difference respectively; F represents the range of air temperature and surface temperature. Observation on September 27–29, 2021

于90%的地表凝结水都来自近地面空气中的水汽^[19],而固沙灌丛枝叶等构型特征会拦截近地面的水汽到达地表的量,从来源上减少了地表凝结水的形成^[13];另一方面,在固沙灌丛的遮荫作用下,灌丛下地表温度低于灌丛外,导致灌丛下地表蒸发量较小,使表层土壤含水量高于裸地和灌丛外围地区^[46–47]。与干燥的土壤相比,湿润的土壤导热率更

高,更易于从深层土壤中获得热量,导致地表温度差减小,不利于水汽凝结^[25]。对毛乌素沙地臭柏和油蒿群落地表凝结水的观测结果发现,不同类型的植物群落会促进凝结水形成,呈臭柏群落凝结水量最大,油蒿群落次之,裸地最小^[31,38],研究结果与我们的结果不一致,原因可能涉及以下几个方面:首先是由于受植物群落的影响,枝叶会遮挡太阳辐射

并削弱空气热量上下层的交换,降低空气温度;其次植物的存在增加了地表的粗糙度,且枝叶对气流具有阻挡作用,减小了近地面的风速;再者植物的蒸腾作用也会增加近地表的空气相对湿度。草地、灌木林、混交林的日平均温度较裸地(无植物影响的空旷地)分别降低了0.58、1.12、1.51℃,日土壤平均温度分别降低了0.55、6.2、8.75℃,而日均相对湿度分别增加了1.67%、9.67%、12.1%^[48]。由此可见,植物群落可以降低空气温度和地表温度,增加大气相对湿度,从而促进凝结水的形成。在同一植物群落中,植物间空地的地表凝结水量高于灌丛下凝结水量^[19],固沙灌丛下地表凝结水量降低,且由外边缘至灌丛根部呈持续降低的趋势(图4)。这可能是由于灌丛根部的枝条密集,能够拦截更多的水汽,形成的凝结水量也自然比较少;随植物枝条外延,次级枝条发育,枝条逐渐分散,密度降低,对水汽的拦截作用也相对减弱,形成的凝结水量也较多。

不同类型固沙灌丛下地表凝结水量也表现出一定差异(图3)。与对照相比,沙柳、油蒿和柠条下地表凝结水量分别减少了29%、32%和33%。不同类型固沙灌丛影响区地表凝结水量的差异可能与其枝条构型差异有关。柠条的枝条较沙柳来说更密集,冠幅较油蒿来说更大(表1),一方面能够拦截更多的水汽,减少了凝结水的来源;另一方面,构型结构密集、复杂的灌丛遮阴作用更明显,拦截更多的太阳辐射,使地表保持较低的温度,导致地表凝结水量减少。与柠条和油蒿相比,沙柳冠幅更大,但是其枝条较稀疏,对近地面水汽的拦截作用和遮阴作用不如前者,地表形成的凝结水量也较多。白天随着空气温度的增加,地表温度也随之上升,夜间形成的凝结水开始蒸发。由于固沙灌丛的遮阴作用,灌丛下地表吸收的太阳辐射与对照相比较少,地表温度低^[49],导致灌丛下地表蒸发速率也变缓。但是灌丛下地表凝结水量小于对照处理(图3),造成灌丛下地表凝结水蒸发所需的时间仍然小于对照处理。

此外,在固沙灌丛影响下,不同位置地表凝结水量的差异同样可以用地表温度的变化进行解释。在白天,固沙灌丛具有遮荫作用,即地表温度由根部至冠幅外缘递增的趋势,而在夜间基本相反(图8)。主要的原因是由于靠近根部灌丛枝叶更加密集,白天地表能接收的太阳辐射能量较有限,地表温度升高的幅度相对较小,而冠幅外围的地表受冠

幅遮阴作用较小,能够吸收较多的太阳辐射能量,白天地表温度较高;夜间枝叶阻碍了大气与灌丛下近地表的气流交换,在灌丛根部阻碍作用尤为强烈,导致夜间灌丛下地表温度表现出由根部到冠幅外缘递减的趋势。凝结水主要在夜间形成,凝结水量与地表温度呈现相反的趋势,即地表温度越高,凝结水量越少。因此,灌丛下地表温度的差异导致了不同位置地表凝结水量的差异。与固沙灌丛下不同位置地表凝结水量的显著差异不同的是,固沙灌丛不同方向上地表凝结水量差异不显著(图5)。在白天,随着太阳的东升西落,灌丛四周地表可以在白天同一时间内接受到不同强度的太阳辐射,导致灌丛四周地表温度的变化具有动态性和复杂性(图8),可能导致灌丛植物影响区不同方向上地表凝结水量的差异不显著。

3.2 气象因子对地表凝结水形成和蒸发的影响

气象因子与地表凝结水量之间的关系十分密切。受气象因子和下垫面条件的影响,地表凝结水的形成和蒸发过程变得十分复杂^[17,27,38,50]。本研究的结果表明,地表凝结水的变化与空气湿度的变化呈显著正相关关系,与空气温度和地表温度的变化呈显著负相关关系(图9)。研究结果与李玉灵等^[29]在毛乌素沙地凝结水影响因素的研究结果一致。成龙等^[22]在青海省高寒沙区关于凝结水与近地表温湿度关系的研究中也得到类似的研究结果。当地表温度接近或低于空气温度时,空气中的水汽受温度梯度的影响逐渐向地面移动,地表出现水分凝结现象,而风速与地表凝结水之间的关系不明显(图9)。有研究结果表明,风速对凝结水形成的影响比较复杂,在较大时间尺度(月尺度和季节尺度)上风速与凝结水量呈负相关关系^[17],可能是本研究在小时间尺度上(昼夜尺度)上未能发现风速对凝结水的显著影响的原因。

固沙灌丛可能是通过改变冠幅下地表微环境来影响地表凝结水的。不同类型固沙灌丛的冠幅大小、枝叶疏密、枝条与地面夹角等特征差异(表1),都会导致不同类型固沙灌丛下地表气象条件发生变化。究其原因,可能是灌丛枝叶对太阳辐射的拦截作用削弱了其到达地面的能量^[51]。白天对照处理地表温度高于灌丛植物影响区且大气温度在小尺度上的差异很小,导致大气与对照地表温度差大于大气与固沙灌丛下地表温度差,导致对照处理

的土壤表层蒸发量较大,土壤含水量较低。干燥的土壤更有利于在气温降低时吸附空气中的水汽,加之大气地表温度差与凝结水量呈正相关关系^[36,52],即白天大气地表温度差的增加有利于凝结水的形成^[26],这可能是对照处理地表凝结水量大于固沙灌丛影响区的主要原因。需要说明的是,本研究发现07:00之后,地表仍然能观测到水分凝结现象,并持续到08:00左右。所以,本试验采用的时间节点低估了该地区地表凝结水量。在以后的观测过程中,把相应的时间节点做调整,以便获得更加准确的结果。

4 结论

固沙灌丛的存在显著降低了地表凝结水量,沙柳、油蒿和柠条冠幅灌丛下地表凝结水量与对照处理相比分别降低了29%、32%和33%。地表凝结水量自灌丛外缘至灌丛根部呈显著降低的趋势,而在不同方向上的差异不显著。地表凝结水自19:00开始形成,至次日08:00达到峰值,期间地表凝结水的形成过程基本表现出增加—平缓—增加的趋势,夜间油蒿和柠条样地凝结水甚至还有所蒸发。夜间形成的凝结水在次日13:00—15:00蒸发殆尽。凝结水与空气相对湿度呈显著正相关关系,与空气温度和地表温度呈显著负相关关系,与风速变化之间的相关性不显著。白天固沙灌丛下地表温度由外向里呈降低趋势,而夜间正好相反。固沙灌丛削弱了太阳辐射,缓冲了地表温度变化,从而减缓了地表水分凝结和蒸发过程。

参考文献:

- [1] 郭占荣,刘建辉.中国干旱半干旱地区土壤凝结水研究综述[J].干旱区研究,2005,22(4):160-164.
- [2] Pan Y X, Wang X P, Zhang Y F. Dew formation characteristics in a revegetation-stabilized desert ecosystem in Shapotou area, Northern China[J]. Journal of Hydrology, 2010, 387: 265-272.
- [3] Kidron G J. Angle and aspect dependent dew and fog precipitation in the Negev desert[J]. Journal of Hydrology, 2005, 301: 66-74.
- [4] Kidron G J, Temina M. Non-rainfall water input determines lichen and cyanobacteria zonation on limestone bedrock in the Negev Highlands[J]. Flora, 2017, 229: 71-79.
- [5] Kidron G J, Starinsky A. Measurements and ecological implications of non-rainfall water in desert ecosystems: a review[J]. Ecohydrology, 2019, 12: 1356-1366.
- [6] Comanns P, Withers P C, Esser F J, et al. Cutaneous water collection by a moisture-harvesting lizard, the thorny devil (*Moloch horridus*) [J]. Journal of Experimental Biology, 2016, 219: 3473-3479.
- [7] Pan Z, Pitt W G, Zhang Y M, et al. The upside-down water collection system of *Syntrichia caninervis* [J]. Nature Plants, 2016, 2: 16076.
- [8] 郭占荣,刘花台.西北地区凝结水及其生态环境意义[J].地球学报,1999,20(6):762-766.
- [9] Beysens D, Clus O, Mileta M, et al. Collecting dew as a water source on small islands: the dew equipment for water project in Bis'evo (Croatia) [J]. Energy, 2007, 32: 1032-1037.
- [10] Kidron G J. The effect of substrate properties, size, position, sheltering and shading on dew: an experimental approach in the Negev Desert [J]. Atmospheric Research, 2010, 98: 378-386.
- [11] Agam N, Berliner P R. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments: review [J]. Journal of Arid Environments, 2006, 65: 572-590.
- [12] Li S L, Bowker M A, Xiao B. Biocrusts enhance non-rainfall water deposition and alter its distribution in dryland soils [J]. Journal of Hydrology, 2021, 595: 126050.
- [13] Pan Y X, Wang X P. Effects of shrub species and microhabitats on dew formation in a revegetation-stabilized desert ecosystem in Shapotou, northern China [J]. Journal of Arid Land, 2014, 6: 389-399.
- [14] Zhang J, Zhang Y M, Downing A, et al. The influence of biological soil crusts on dew deposition in Gurbantunggut Desert, Northwestern China [J]. Journal of Hydrology, 2009, 379: 220-228.
- [15] 成龙,贾晓红,吴波,等.高寒沙区生物土壤结皮对吸湿凝结水的影响[J].生态学报,2018,38(14):5037-5046.
- [16] 潘颜霞,张亚峰,虎瑞.吸湿凝结水对荒漠地区生物土壤结皮生态功能的影响综述[J].地球科学进展,2022,37(1):99-109.
- [17] 杨路明.毛乌素沙地地表凝结水形成过程及其环境影响因子[D].北京:北京林业大学,2016.
- [18] 尹瑞平,吴永胜,张欣,等.毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮对凝结水形成和蒸发的影响[J].生态学报,2013,33(19):6173-6180.
- [19] Pan Y X, Wang X P, Zhang Y F, et al. Dew formation characteristics at annual and daily scale in xerophyte shrub plantations at Southeast margin of Tengger Desert, Northern China [J]. Ecohydrology, 2018, 11: e1968.
- [20] 侯新伟,张发旺,崔晓梅,等.毛乌素沙地东南缘土壤凝结水的形成规律[J].干旱区资源与环境,2010,24(8):36-41.
- [21] Kidron G J. Altitude dependent dew and fog in the Negev Desert, Israel [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 96: 1-8.
- [22] 成龙,贾晓红,吴波,等.高寒沙区吸湿凝结水凝结过程与湿度的关系[J].中国沙漠,2019,39(3):77-86.
- [23] 潘颜霞,王新平,张亚峰,等.沙坡头地区地形对凝结水形成特征的影响[J].中国沙漠,2014,34(1):118-124.
- [24] 王积强.关于“土壤凝结水”问题的探讨:与于庆和同志商榷

- [J].干旱区地理,1993,16(2):58-62.
- [25] 冯起,高前兆.半湿润沙地凝结水的初步研究[J].干旱区研究,1995,12(3):72-77.
- [26] 潘颜霞.沙坡头人工固沙过程中吸湿凝结水形成特征研究[D].北京:中国科学院大学,2010.
- [27] 张静,张元明,周晓兵,等.生物结皮影响下沙漠土壤表面凝结水的形成与变化特征[J].生态学报,2009,29(12):6600-6608.
- [28] 李胜龙,肖波,孙福海.黄土高原干旱半干旱区生物结皮覆盖土壤水汽吸附与凝结特征[J].农业工程学报,2020,36(15):111-119.
- [29] 李玉灵,朱帆,张国盛,等.毛乌素沙地凝结水动态变化及其影响因子的研究[J].干旱区资源与环境,2008,22(8):61-66.
- [30] 刘新平,何玉惠,赵学勇,等.科尔沁沙地不同生境土壤凝结水的试验研究[J].应用生态学报,2009,20(8):1918-1924.
- [31] 钱连红,李洪波,张国盛,等.毛乌素沙地三种下垫面土壤吸湿凝结水量的比较[J].干旱区资源与环境,2009,23(3):122-125.
- [32] Xiao H, Meissner R, Seeger J, et al. Effect of vegetation type and growth stage on dewfall, determined with high precision weighing lysimeters at a site in northern Germany [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 377: 43-49.
- [33] 张新时.毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式[J].植物生态学报,1994,18(1):1-16.
- [34] 王博,丁国栋,顾小华,等.毛乌素沙地腹地植被恢复效果初步研究:以内蒙古乌审旗为例[J].水土保持研究,2007,14(3):237-238.
- [35] 李洪波,白爱宁,张国盛,等.毛乌素沙地土壤凝结水来源分析[J].中国沙漠,2010,30(2):241-246.
- [36] 张晓影,李小雁,王卫,等.毛乌素沙地南缘凝结水观测实验分析[J].干旱气象,2008,26(3):8-13.
- [37] Sun Y L, Li X Y, Xu H Y, et al. Effect of soil crust on evaporation and dew deposition in Mu Us Sandy Land, China [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2008, 2: 480-486.
- [38] 李洪波.半干旱区凝结水形成机制及对植物水分特性的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [39] 桂子洋,秦树高,胡朝,等.毛乌素沙地两种典型灌木叶片凝结水吸收能力及吸水途径[J].植物生态学报,2021,45(6):583-593.
- [40] Kidron G J, Temina M. The Effect of dew and fog on lithic lichens along an altitudinal gradient in the Negev Desert [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2013, 30: 281-290.
- [41] Temina M, Kidron G J. Lichens as biomarkers for dew amount and duration in the Negev Desert [J]. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2011, 206: 646-652.
- [42] Chávez-Sahagún E, Andrade J L, Zotz G, et al. Dew can prolong photosynthesis and water status during drought in some epiphytic bromeliads from a seasonally dry tropical forest [J]. *Tropical Conservation Science*, 2019, 12(5): 479-488.
- [43] 康跃虎,陈荷生.沙坡头地区凝结水及其在生态环境中的意义[J].干旱区资源与环境,1992,6(2):63-72.
- [44] 吴永胜,尹瑞平,田秀民,等.毛乌素沙地南缘人工植被区生物结皮发育特征[J].中国沙漠,2018,38(2):339-344.
- [45] 吴永胜,哈斯,屈志强.影响生物土壤结皮在沙丘不同地貌部位分布的风因子讨论[J].中国沙漠,2012,32(4):980-984.
- [46] 张义凡,陈林,刘学东,等.荒漠草原2种群落灌丛堆土壤水分的空间特征[J].西南农业学报,2017,30(4):836-841.
- [47] 李小军.地表径流对荒漠灌丛生境土壤水分空间特征的影响[J].中国沙漠,2012,32(6):1576-1582.
- [48] 徐丽萍,杨改河,姜艳,等.黄土高原人工植被小气候生态效应研究[J].水土保持学报,2008,22(1):163-167.
- [49] Kidron G J. Under-canopy microclimate within sand dunes in the Negev Desert [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 392: 201-210.
- [50] 陈荣毅.古尔班通古特沙漠表层土壤凝结水水汽来源特征分析[J].中国沙漠,2012,32(4):985-989.
- [51] 张亚峰,王新平,虎瑞,等.荒漠灌丛微生物生境土壤温度的时空变异特征:灌丛与降水的影响[J].中国沙漠,2013,33(2):536-542.
- [52] 方静,丁永建.干旱荒漠区沙土凝结水与微气象因子关系[J].中国沙漠,2015,35(5):1200-1205.

Effects of surface dew under different types of sand-fixing shrubs in the southern margin of Mu Us Sandy Land, Northern China

Chen Xiaohan, Wu Yongsheng, Hai Chunxing

(College of Geographical Science / Key Laboratory of Mongolian Plateau's Climate System, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: Although the important role of dew in arid system has been widely recognized, its characteristics of temporal and spatial variation under sand-fixing shrubs has been paid less attention. To better understand the influence of surface dew under sand-fixing shrubs, three typical artificial sand-fixing shrubs (*Salix psammophila*, *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica*) on the southern edge of the Mu Us Sandy Land, Northern China were selected and the bare sand without the effect of sand-fixing shrubs was used as the control in this study. The deposition and evaporation characteristics of surface dew in different positions (root, 1/2 crown width and periphery crown width) and directions (east, south, west and north) under sand-fixing shrubs were measured by micro-lysimeter. The results showed: (1) compared with the control, the presence of sand-fixing shrubs significantly reduced the amount of surface dew, and the amount of dew under *Salix psammophila*, *Artemisia ordosica* and *Caragana korshinskii* decreased by 29%, 32% and 33% respectively. (2) The amount of surface dew under different types of sand-fixing shrubs showed a significant increasing trend from the inside to the outside, but the difference in the amount of surface dew in different directions was not significant. (3) The existence of sand-fixing shrubs slowed down the deposition and evaporation of surface dew, that was, the formation of dew started at 19:00 at night, ended at 08:00 the next day, and evaporated from 13:00–15:00. The deposition process of dew showed an overall trend of increasing, fluctuating and increasing. The surface dew under *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica* even evaporated a little from 03:00 to 05:00, and the evaporation process showed a steady downward trend. (4) The formation process of dew had a significant positive correlation with relative humidity, and a significant negative correlation with atmospheric temperature and surface temperature. Sand-fixing shrubs buffered surface temperature changes by intercepting solar radiation to slow down the deposition and evaporation processes of dew.

Key words: dew; sand-fixing shrubs; evaporation; Mu Us Sandy Land; arid ecosystem