

生物结皮影响下沙漠土壤表面凝结水的形成与变化特征

张 静^{1,2}, 张元明^{1,*}, 周晓兵^{1,2}, 张丙昌^{1,2}, 魏美丽^{1,2}

(1. 中国科学院干旱区生物地理与生物资源重点实验室, 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:在水资源匮乏的沙漠生境, 凝结水是植物、生物结皮、无脊椎和脊椎小动物的重要水分来源之一。采用微渗计法对比研究 3 种生物结皮类型(藻结皮、地衣结皮和苔藓结皮)和自然裸沙对地表凝结水量及凝结水蒸散过程的影响。微渗计的规格为内径 6 cm, 高 3.5 cm 的 PVC 管。研究表明:不同类型地表的总凝结水量之间存在极显著的差异($P < 0.01$), 总凝结水量随生物结皮发育水平呈显著增加的趋势, 依次为:裸沙 < 藻结皮 < 地衣结皮 < 苔藓结皮, 即生物结皮的存在有利于沙漠地表凝结水的形成。不同类型地表凝结水量的日均值有所差异。对于同一地表类型, 凝结水量的最大值为最小值的数倍。黎明时, 苔藓结皮的凝结水量最大, 而裸沙的凝结水量最小, 地衣结皮和藻结皮居中。凝结现象自 20:00 ~ 22:00, 次日 8:00 ~ 9:00 结束。大多数日出后凝结现象仍继续发生。不同类型地表的凝结及蒸散过程经历 2 个阶段:日出前凝结水量呈缓慢增加的趋势, 日出后随温度的升高凝结水量快速减少, 其中以苔藓结皮凝结水量下降最为迅速。凝结水量主要受温度、大气湿度、凝结面类型、气象条件和生境等方面因素的影响。

关键词:凝结水;藻结皮;地衣结皮;苔藓结皮;裸沙;古尔班通古特沙漠

文章编号:1000-0933(2009)12-6600-09 中图分类号:Q143 文献标识码:A

The influence of biological soil crusts on dew deposition and characteristics of soil surface in Gurbantunggut Desert

ZHANG Jing^{1,2}, ZHANG Yuan-Ming^{1,*}, ZHOU Xiao-Bing^{1,2}, ZHANG Bing-Chang^{1,2}, WEI Mei-Li^{1,2}

1 Key Laboratory of Biogeography and Bioresource in Arid Land, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6600 ~ 6608.

Abstract: In desert environments, dew is an important source of moisture for plants, biological soil crusts, invertebrates and small vertebrates. In this paper, measurements were taken to investigate the effects of three different types of biological soil crusts (algae, lichen, moss) and bare sand on dew deposition, dew duration and evaporation pattern in Gurbantunggut Desert. Dew quantities were measured using micro-lysimeters with a diameter of 6 cm and a height of 3.5 cm. The results indicated that the total dew amounts of different soil surface types were significantly different ($p < 0.01$), it increased with the development of biological soil crusts, in the following order: sand < algae crust < lichen crust < moss crust. It can be concluded that the occurrence of biological soil crusts benefited dew deposition. Average daily dew amounts varied along with different soil surfaces. During the period of this study, for each type of crust studied, the maximum amount of dew was several times greater than the minimum. Moss crust was characterized by having the greatest amount of dew at dawn, whereas bare sand yielded the lowest amount of dew, lichen crust and algae crust exhibited intermediate values. Dew deposition began at 20:00 – 22:00 and ended at 8:00 – 9:00 the next morning. A continuous dew deposition even after

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40571085; 40771114); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX3-SW-343)

收稿日期:2008-08-25; 修订日期:2009-04-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangym@ms.xjb.ac.cn

sunrise was also observed. The time course of dew accumulation and drying on different soil surfaces could be divided into two parts: dew amounts increased gradually before sunrise, and after then dew amounts decreased rapidly with higher temperature. Dew deposition was mainly affected by air temperature near the surface, soil temperature, the air relative humidity and the kind of surface. The data, thus, indicated the important effect of biological soil crusts on dew formation and may assist in evaluating the significant ecological role of dew in the arid and semi-arid environments.

Key Words: dew; algae crust; lichen crust; moss crust; bare sand; Gurbantunggut Desert

干旱区降水稀少,蒸发强烈,任何补充性的水资源都可能对干旱区生态系统产生积极的影响。在水资源匮乏的沙漠生境,除降雨之外,凝结水和雾水是重要的水分来源。虽然凝结水量相对微小,但是据内盖夫沙漠地区 17a 的观测结果,一年中有凝结现象发生的天数为 195d,凝结量为 33 mm^[1]。凝结水是沙漠中某些植物^[2]、昆虫^[3]、节肢动物^[4]、地衣^[5]、生物土壤结皮^[6]的重要水分来源之一。凝结水可以提高沙漠中 1 年生植物种子的萌发^[7],有效地减少因土壤蒸发而损失的水分^[8],在沙丘稳定性方面也有着重要的意义^[9,10]。

国外学者在干旱区凝结水方面已开展了大量的研究,包括凝结水的测定方法^[11,12]、凝结水的形成机理^[9,13]、凝结水量和持续时间的影响因素^[8,14~18]、凝结水量和持续时间的定量模拟^[19~24]、凝结水的生态学和水文学意义等^[25~27]。

我国学者针对以上方面先后在塔里木河中游^[28]、沙坡头地区^[29]、内蒙古科尔沁沙地^[30]、腾格里沙漠边缘^[31]、天山北麓昌吉地下水均衡试验场^[32~34]、甘肃省河西走廊流动沙漠边缘^[35]、毛乌素沙漠边缘^[36]、荒漠绿洲边缘^[37]、鄂尔多斯风沙滩^[38]、新疆罗布泊^[39]等地开展了凝结水方面的研究工作。近年来,有学者对于旱、半干旱地区凝结水的研究进展进行了综述^[40,41],为我国干旱区凝结水的研究奠定了良好的基础。

古尔班通古特沙漠位于新疆北部准噶尔盆地中部,是我国最大的固定和半固定沙漠,丘间低地是该沙漠生物结皮发育最为完善的区域,苔藓结皮和地衣结皮镶嵌分布,使得这些区域的生物结皮具有较大的厚度和较强的抗机械干扰能力。目前,在该沙漠关于地表凝结水的研究尚十分缺乏,尤其是针对生物结皮在凝结水形成中的作用方面尚未见报道。本文开展了生物结皮影响下凝结水量和持续时间的连续日观测,旨在通过对不同类型结皮上凝结水过程、数量以及日变化特征的研究,为深入认识生物结皮在荒漠生态系统水分来源中的生态作用提供依据。

1 研究区概况

古尔班通古特沙漠(44°11' ~ 46°20'N, 84°31' ~ 90°00'E)位于新疆北部准噶尔盆地腹心,面积 4.88 × 10⁴ km²,是我国最大的固定和半固定沙漠。该沙漠年平均降水量普遍不超过 150 mm,沙漠腹地年降水量约为 70 ~ 120 mm,降水季节分配较为均匀。年潜在蒸发量约 2000 mm 左右。年均温 6 ~ 10 °C,极端高温为 40 °C 以上,≥10 °C 的活动年积温可达 3000 ~ 3500 °C,空气相对湿度平均 50% ~ 60%,5 ~ 8 月份通常在 45% 以下。该沙漠由白梭梭、梭梭和其它沙生植物构成的小半乔木群落广泛发育,同时由于降水的季节分配较为均匀,使短命和类短命植物获得一定发育。除此之外,该沙漠地表还发育有良好的生物结皮,不同发育水平的生物结皮其种类组成具有较大的差别,同时,该沙漠不同沙垄地貌部位生物结皮具有较强的选择性分布特征(表 1)^[42~44]。

2 研究方法

凝结水的测量方法多种多样,根据研究目的的不同可以归纳为 3 类:(1)凝结水持续时间的测定,主要是利用相关的仪器,例如全电阻栅极、叶片湿度传感器等。(2)凝结水量的测定,常用的方法是 Duvdevani 凝结水计量器法、人造凝结面法。(3)凝结水量和持续时间的综合测定,所采用的方法是 Hilter 凝结水平衡法、微渗计法等。目前仍旧没有统一的国际通用的凝结水测量方法^[9,22,24]。

本文采用自制的微渗计观测不同类型地表的凝结水量、凝结水持续时间、凝结及蒸散过程。微渗计的规

格为:内径=6 cm;高=3.5 cm 的 PVC 管^[11]。在古尔班通古特沙漠的丘间低地选择地势平坦的样地,其上发育有完好的苔藓结皮、地衣结皮和藻结皮(种类组成见表 1),并将自然裸沙作为对照。将微渗计垂直插入土壤中,小心取得未扰动的样品,封底后将微渗计放回原位,微渗计的边缘与土壤表面持平。每一样品重复 5 个。所有样品的采集均避开灌丛的影响。

表 1 古尔班通古特沙漠生物结皮的特点及其分布特征^[42~44]

Table 1 The characteristics and distribution patterns of biological soil crusts developed in Gurbantunggut Desert^[42~44]

项目 Item	结皮类型 Crust type		
	藻结皮 Algae crust	地衣结皮 Lichen crust	苔藓结皮 Moss crust
特点 Feature	灰至灰白色,表面光滑平坦	色黑而质硬	干燥时呈黑色、黑褐色,湿润时呈绿色,植物体密集,垫状丛生,表面呈明显的凹凸状
平均厚度 Average thickness(cm)	0.28	1.29	2.2
抗压强度 Compression strengths(kPa)	32.29 ± 9.96	52.27 ± 8.34	57.28 ± 5.12
分布 Distribution	主要分布于两坡上部,从沙垄至丘间低地,藻结皮逐渐被地衣和苔藓结皮所取代,仅在局部区域以“马赛克”的形式出现	沿沙坡至丘间低地,地衣结皮成片发育,在水蚀或风蚀后留下的地表突出部位发育强烈	主要分布于丘间低地和两坡中下部的低矮灌丛附近,在灌丛间也形成面积不等的纯群
物种组成 Species composition	具鞘微鞘藻 <i>Microcoleus vaginatus</i> ; 沼地微鞘藻 <i>Microcoleus paludosus</i> ; 固氮鱼腥藻 <i>Anabaena azotica</i> ; 马氏鞘丝藻 <i>Lyngbya martensiana</i> ; 鞘丝异球藻 <i>Xenococcus lyngbye</i>	荒漠黄梅 <i>Xanthoparmelia desertorum</i> ; 坚韧胶衣 <i>Collema tenax</i> ; 红鳞网衣 <i>Psora decipiens</i> ; 藓生双缘衣 <i>Diploschistes muscorum</i>	刺叶墙藓 <i>Tortula desertorum</i> ; 真藓 <i>Bryum argenteum</i> ; 绿色流苏藓 <i>Crassidium chloronotos</i>

于 2008 年 4 月 26 日至 5 月 23 日开展实验。每日日落前 19:00 和次日日出前 7:00 用电子天平(精度 1%)称得微渗计内土壤样品的重量变化。由于微渗计已封底,其重量变化是空气中的水汽和微渗计内土壤水分在上界面处交换的结果,重量增加则为凝结量,减少则为蒸发量。凝结及蒸散过程于 5 月 18 日至 23 日进行加密测定,时间间隔为 2h。以质量表示的凝结水量转换成以高度表示的凝结水量,其计算公式为:

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

式中, H 为凝结量(mm); m 为样品重量变化(g); r 为微渗计的半径(cm); ρ 为水的密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。

土壤温度由土壤 4 参数监测系统的土壤电导/温度传感器测得,温度测量范围: $-20 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度: $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。近地面气温和大气相对湿度由 HC-520 电子温湿度计同步测得,温度测量范围: $-50 \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度: $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;湿度测量范围:20%~99%,精度: $\pm 5\%$ 。

数据统计分析均使用 SPSS(11.5)软件完成,采用 Excel 2003 和 Origin 8.0 绘图。

3 结果与分析

3.1 不同类型生物结皮表面凝结水量的基本特征

观测期间,共有 17 次凝结水的观测记录(图 1)。除大风和阴雨天气外,几乎每天都有凝结现象发生。阴天的夜晚,由于有云层的“保护”,地面温度下降相对较慢,所以不利于形成凝结水。适当的风速可以在一定程度上加快暖湿空气的流动,补充近地表的水汽,增大凝结水形成的概率,但是如果风速较大,则会加快空气对流,有助于蒸发而不利于凝结。

不同类型地表的总凝结水量差异极显著($P < 0.01$),总凝结水量随生物结皮的发育程度呈显著增加的趋势,表现为:裸沙 < 藻结皮 < 地衣结皮 < 苔藓结皮。不同类型地表凝结水量的均值之间也存在极显著性的差异($P < 0.01$),且变化趋势与总凝结水量的变化趋势一致。最大凝结水量出现在 4 月 26 日,其显著性差异见(表 2);最小值出现在 5 月 13 日,苔藓结皮的凝结水量仅为 0.008 mm,而地衣结皮、藻结皮和裸沙上未

监测到凝结水的形成(表 2)。

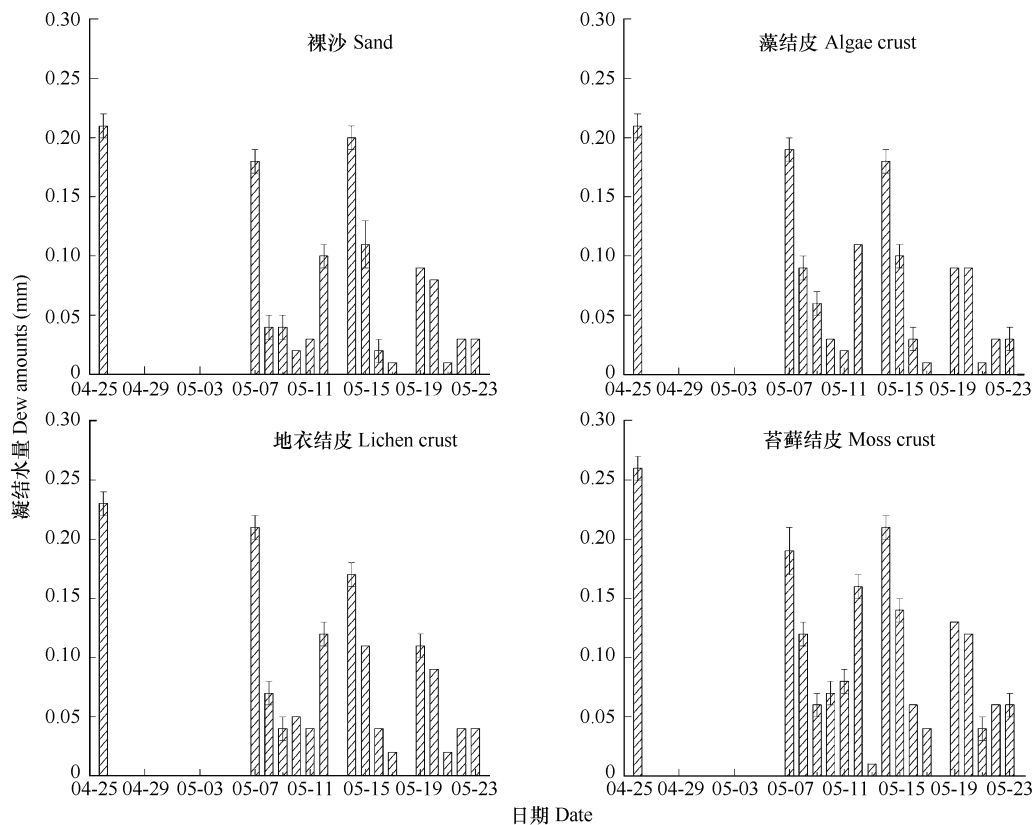


图 1 不同类型地表凝结水的日变化特征
Fig. 1 Daily dew amounts on crusts and sand surface at the experimental site during April to May

表 2 不同类型地表凝结水量的描述统计特征

地表类型 Soil surface type	总凝结水量 (mm) Total dew amounts	平均值 (mm) Mean	最大值 (mm) Maximum	最小值 (mm) Minimum
裸沙 Sand	1.208 ± 0.021 D	0.071 ± 0.0012 D	0.206 ± 0.005 c	0.008 ± 0.004
藻结皮 Algae crust	1.296 ± 0.014 C	0.076 ± 0.0009 C	0.206 ± 0.007 c	未监测到
地衣结皮 Lichen crust	1.410 ± 0.015 B	0.083 ± 0.0009 B	0.232 ± 0.007 b	未监测到
苔藓结皮 Moss crust	1.816 ± 0.018 A	0.107 ± 0.0010 A	0.256 ± 0.010 a	未监测到

不同大写字母表示差异极显著 Different capital letters indicate significant difference, $P < 0.01$; 不同小写字母表示差异显著 Different small letters indicate difference, $P < 0.05$

3.2 不同类型地表的凝结及蒸散过程

为了更好地研究不同类型地表的凝结及蒸散过程,本文进行了为期 8d 的加密观测,结果如图 2 所示。不同类型地表的凝结及蒸散过程呈单峰曲线,凝结现象自 22:00 开始至 8:00 结束,有时能持续至 10:00 左右。凝结过程经历 2 个阶段:日出前凝结水量呈缓慢增加的趋势,日出后随温度的升高凝结水量快速减少,其中苔藓结皮凝结水量下降最为迅速。凝结水量的最大值一般出现在 9:00 左右,所以观测时间的选择显得尤为重要。在大多数日出后,凝结水仍然存在,即凝结水在一定时间范围内保存于地表。苔藓结皮的凝结水量最大,其次为地衣结皮和藻类结皮,二者的凝结水量相近,裸沙的凝结水量最低,这一凝结及蒸散过程与凝结水的日变化特征一致。

3.3 不同类型地表凝结水量与温度之间的关系

由凝结水量与近地表气温随时间的变化图可以看出,凝结现象自日落后开始出现,凝结水量随近地表温

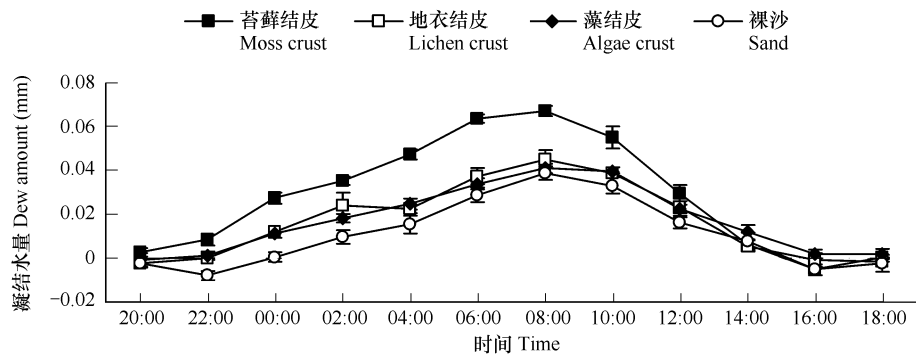


图2 不同类型地表的凝结及蒸散过程

Fig. 2 The course of measured cumulative dew and the drying process on different soil surfaces

度的降低呈缓慢增加的趋势,之后随地表温度的升高而快速减少(图3),观察发现其中以苔藓结皮凝结水量的下降速率最快。进一步分析表明,白天有生物结皮(地衣结皮和苔藓结皮)覆盖区域的土壤温度高于无生物结皮覆盖区域,而夜晚则相反(图4)。

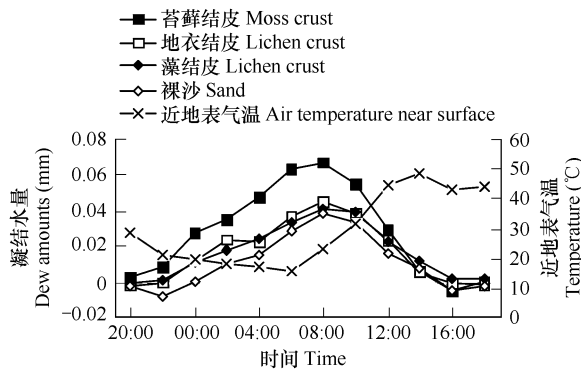


图3 不同类型地表凝结水量与近地表气温之间的关系

Fig. 3 Relationship between dew amounts and temperature near the soil surface

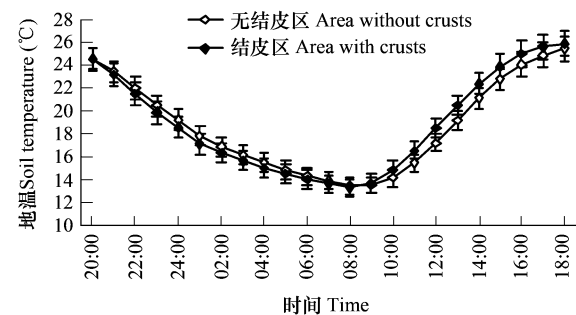


图4 结皮区与无结皮区地温的日变化特征

Fig. 4 The diurnal variation of soil temperature compared between an area covered by biological soil crusts and an area devoid of crusts

3.4 不同类型地表凝结水量与大气相对湿度之间的关系

不同类型地表凝结水量和大气相对湿度随时间的变化趋势相似(图5),近地表气温通过影响大气相对湿度从而影响凝结水量和凝结速率。夜晚近地表气温降低,大气相对湿度增加,凝结水量也随之增加;白天近地表气温的快速升高导致大气相对湿度和凝结水量都随之下降,直到沙地蒸发或外来水汽补充了近地表空气水分后,凝结水量才呈回升的趋势。

4 讨论

土壤表层凝结水主要有3种来源:近地面空气中的水汽、土壤中的水汽、植物蒸腾和呼吸作用散逸的水汽^[13]。干旱区凝结水的产生受诸多因素的影响,其中,地表温度低于近地面空气温度是凝结水发生的必要条件,此外,大气相对湿度、凝结面类型、生境、气象条件等因素也对凝结水的形成有一定的影响。本文是在外界条件完全一致的情况下进行的同步观测,气象条件对凝

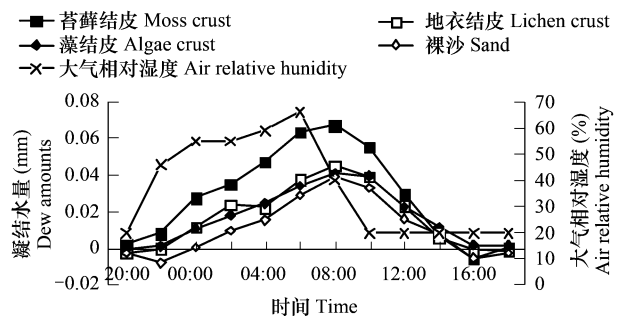


图5 不同类型地表凝结水量与大气相对湿度之间的关系

Fig. 5 Relationship between dew amounts and air relative humidity

凝结水形成和变化的影响完全相同,因此,凝结水变化特征主要受地表不同生物结皮类型的影响。

4.1 苔藓结皮对凝结水的影响

该沙漠组成生物结皮的藓类植物属于变水植物,变水特征决定了其含水量随环境的变化而变化。植物体内含水量的变化直接影响着许多生理代谢活动。当水分条件恶劣时,它们便停止光合作用而转入休眠状态,表现为叶片干燥皱缩,紧贴于茎,大大减少了叶片暴露在大气中的表面积,不仅减少自身体内水分的蒸发,又可以防止叶片和茎遭受强光辐射,干燥时的苔藓结皮呈黑色、黑褐色^[45];一旦环境条件变得适宜于其生存,叶片能够迅速吸水展开,整个植株体瞬间呈现鲜绿色或黄绿色,恢复正常的生理代谢活动。

Tuba 等研究表明,土生墙藓遇水后 3 min 内就可以进行光合作用,30 min 后其光合速率就可恢复到正常状态^[46]。即使不到 1mm 的零星降雨都能够激活大多数物种的生理代谢活动^[47]。除降雨之外,苔藓植物还可以吸收利用清晨短暂但频繁出现的凝结水,Csintalan 等观察发现苔藓植物在黎明后 1.5 h 表现为净 CO₂ 的吸收,可见凝结水对苔藓植物的光合作用具有积极的影响,凝结水还有利于减缓长期干旱对植物体细胞造成的损害^[48]。

本文研究结果表明,黎明或日出期间形成的凝结水量最大,且大多数日出后凝结现象仍在继续,其它地区的研究也证实了此结论^[15,29,31,33]。日出后凝结水量随地表温度和大气辐射的迅速增加而快速减少,观察发现其中以苔藓结皮凝结水量的下降速率最快。进一步分析表明,白天有生物结皮(地衣结皮和苔藓结皮)覆盖区域的土壤温度高于无生物结皮覆盖区域,而夜晚则相反(图 4)。苔藓结皮白天增温较快,高温促使地表凝结水的快速蒸发与近地表相对湿度的下降,从而导致凝结水量下降;而夜晚苔藓结皮温度下降较快,当低于近地表气温时,空气中的水汽开始向地表凝结。较大的日夜温差有利于苔藓结皮凝结水的生成,凝结水量的逐日变化特征也表明苔藓结皮的总凝结水量最大,其次是地衣结皮、藻结皮和裸沙,与刘立超等的研究结果一致^[18]。

4.2 地衣结皮对凝结水的影响

古尔班通古特沙漠南缘生物结皮中的地衣主要以壳状、鳞状地衣为主。地衣在生物结皮形成初期以自身分泌的地衣酸和其他有机化合物来黏结土壤颗粒,促进土壤的形成成为苔藓植物的生长提供良好的条件^[49]。地衣通过菌丝体表面吸收利用来自降雨、凝结水和雾中的水分。干燥状态下,地衣的含水量仅占干重的 1%~5%,当完全湿润时其含水量可增至 350%。荒漠土壤中常见的胶衣之所以能够适应长期干旱的环境,是因为它能够吸收大量的水分使其含水量达到干重的 36 倍,但是由于它们细胞外缺少皮层和蜡质角质层,所以水分散失的较快^[50]。处于湿润状态时的菌丝体变得半透明有利于光线进入激活其生理代谢活动。Lange 等研究发现,将从野外采集回来的蓝细菌结皮润湿后它能很快恢复生理活性^[51]。随着温度的升高,菌丝体因干燥失水变得不透明,以避免其遭受强光辐射。大多数壳状和鳞状地衣的形态结构不会因自身含水量的改变而改变。沙漠生境中的地衣能够最大限度的吸收利用早晨的凝结水进行自身的光合作用,随着白天温度的上升,地衣因水分的快速散失而处于休眠状态,从而躲避高温和高强辐射对其造成的伤害。

4.3 藻结皮对凝结水的影响

古尔班通古特沙漠中的藻结皮以陆生蓝藻具鞘微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*)为优势种。具鞘微鞘藻的藻丝体往往成束存在,细胞外被有较厚的胶鞘,甚至有些鞘束之间亦相互缠绕,这种结构极大程度上增强了藻丝的抗拉力^[52,53]。短而直的藻丝体(藻殖段)在最初分化阶段是亲水的,并可以移动,它在形成 48h 后,在光照下则变成疏水的,这种变化有利于藻类的固着和迁移^[54]。藻结皮表面干燥时,呈灰黑色,施以外力将其稍加分离,肉眼可见黑绿色藻丝的存在,这些主要为具鞘微鞘藻的藻丝体^[52]。荒漠地区降雨量较小,但是具有数量可观的凝结水,荒漠藻类特别是一些丝状蓝藻细胞外较厚的胶鞘具有充分利用短期降雨或凝结水的能力,一旦降雨胶鞘就能够迅速吸水,以致吸水后的体积可达原来体积的 4~5 倍^[55]。吸水膨胀后的藻体,可将约 40% 的土壤孔隙堵塞,从而影响水分向土壤深层的渗透^[56]。此外,具鞘微鞘藻分泌的胞外水溶性多糖对水分在土壤中的运动也具有阻碍作用,但有利于表层土壤充分吸收水分^[57]。当早晨水分和温度适宜时,藻类就

恢复活性进行生理代谢活动,具鞘微鞘藻的藻丝体从胶鞘中游出,游向土壤表层;随着气温上升,藻丝体为了避免水分进一步散失而退至土壤下层。这种特殊的运动方式可能是解释凝结水在藻结皮表面上持续较长时间的原因之一。

4.4 裸沙对凝结水的影响

裸沙的特点主要表现在土壤孔隙大、持水力差和水分入渗快等方面。土壤表面颗粒吸附或毛细管吸力作用下吸收的水分保留在土壤基质中,吸附水分的多少取决于表面积的大小^[9]。与苔藓和地衣结皮相比,裸沙所能凝结水汽的表面积较小。据 Kidron 的报道,虽然在植物和人工制作的布、玻璃等表面都可见凝结水的存在,但是裸沙上却未出现凝结现象^[15]。Eldridge 对比研究发现,灌丛下呈垫丛状分布的苔藓表面的凝结水量显著高于无苔藓覆盖的裸沙^[58]。本研究发现,与其它 3 种生物结皮(苔藓结皮、地衣结皮和藻结皮)相比,裸沙表面凝结水持续时间较长,这可能是因为裸沙暴露在外的表面积较小,因此受温度和风速的影响较小。

综上所述,位于地表以上的苔藓结皮和地衣结皮具有复杂的微形态和最大的表面积,从而能够最大限度的吸收利用大气中的水汽。同样,正是因为上述特征使得表面水分因太阳辐射和温度的升高而快速蒸发,植物体因水分的散失而转入休眠状态,从而避免高温的伤害。相比较而言,藻结皮和裸沙表面较为光滑,暴露在大气中的表面积较小,因而所能吸附大气中的水汽较少,但是表面凝结水的持续时间较长。

生物结皮广泛分布于世界范围的干旱、半干旱地区,有些地区其盖度高达 70% 以上。据 Kidron 等人^[6]的研究结果,夏秋两季有凝结现象发生的天数为总观测天数的 50%。沙漠中凝结现象的频繁发生有助于此严酷环境中生物结皮的生长和发育^[24]。凝结水作为生物结皮生存的重要水源,对其光合作用的贡献不容忽视。本研究还发现凝结水量随生物结皮发育水平的增加而增加。由此得出的结论是,一方面,凝结水有利于生物结皮的生长和发育,另一方面,生物结皮也有利于凝结水的形成。

References:

- [1] Evenari M. Ecology of the Negev Desert, a critical review of our knowledge. In: Shuval, H. ed. Developments in Arid Zone Ecology and Environmental Quality. Philadelphia, PA: Balaban ISS, 1981. 1—33.
- [2] Duvdevani S. Dew in Israel and its effect on plants. Soil Sciences, 1964, 2:14—21.
- [3] Moffett M W. An Indian ant's novel method for obtaining water. National Geographic Research, 1985, 1:146—149.
- [4] Broza M. Dew, fog and hygroscopic food as a source of water for desert arthropods. Journal of Arid Environments, 1979, 2:43—49.
- [5] Kidron G J. Dew moisture regime of endolithic and epilithic lichens inhabiting limestone cobbles and rock outcrops, Negev Highlands, Israel. Flora, 2000, 195(2):146—153.
- [6] Kidron G J, Hermsstadt I, Barzilay E. The role of dew as a moisture source for sand microbiotic crusts in the Negev Desert, Israel. Journal of Arid Environments, 2002, 52:517—533.
- [7] Guterman Y, ShemTov S. Mucilaginous seed coat structure of *Carrichtera annua* and *Anastatica hierochuntica* from the Negev Desert highlands of Israel, and its adhesion to the soil crust. Journal of Arid Environments, 1997, 35(4):695—705.
- [8] Li X Y. Effects of gravel and sand mulches on dew deposition in the semiarid region of China. Journal of Hydrology, 2002, 260(1-4):151—160.
- [9] Agam N, Berliner P R. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments — A review. Journal of Arid Environments, 2006, 65(4):572—590.
- [10] Subramaniam A R, Kesava Rao A V R. Dew fall in sand dune area of India. International Journal of Biometeorology, 1983, 27:271—280.
- [11] Boast C W, Robertson T M. A “micro-lysimeter” method for determining evaporation from bare soil: description and laboratory evaluation. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46:689—696.
- [12] Kidron G J. A simple weighing method for dew and fog measurements. Weather, 1998, 53:428—433.
- [13] Garratt J R, Segal M. On the contribution of atmospheric moisture to dew formation. Boundary Layer Meteorology, 1988, 45:209—236.
- [14] Kidron G J. Altitude dependent dew and fog in the Negev Desert, Israel. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 96(1-3):1—8.
- [15] Kidron G J. Analysis of dew precipitation in three habitats within a small arid drainage basin, Negev Highlands, Israel. Atmospheric Research, 2000, 55(3-4):257—270.
- [16] Kidron G J. Angle and aspect dependent dew and fog precipitation in the Negev desert. Journal of Hydrology, 2005, 301(1-4):66—74.
- [17] Kidron G J, Yair A, Danin A. Dew variability within a small arid drainage basin in the Negev Highlands, Israel. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2000, 126(562):63—80.
- [18] Liu L C, Li S Z, Duan Z H, et al. Effects of microbiotic crusts on dew deposition in the restored vegetation area at Shapotou, northwest China. Journal of Hydrology, 2006, 328(1-2):331—337.

- [19] Jacobs A F G, Heusinkveld B G, Berkowicz S M. Dew deposition and drying in a desert system: a simple simulation model. *Journal of Arid Environments*, 1999, 42(3):211—222.
- [20] Jacobs A F G, Heusinkveld B G, Berkowicz S M. Dew measurements along a longitudinal sand dune transect, Negev Desert, Israel. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 43(4):184—190.
- [21] Jacobs A F G, Heusinkveld B G, Berkowicz S M. A simple model for potential dewfall in an arid region. *Atmospheric Research*, 2002, 64(1-4):285—295.
- [22] Richards K. Observation and simulation of dew in rural and urban environments. *Progress in Physical Geography*, 2004, 28(1):76—94.
- [23] Wilson T B, Bland W L, Norman J M. Measurement and simulation of dew accumulation and drying in a potato canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 93(2):111—119.
- [24] Zangvil A. Six years of dew observation in the Negev Desert, Israel. *Journal of Arid Environments*, 1996, 32:361—372.
- [25] Lange O L, Belnap J, Reichenberger H. Photosynthesis of the Cyanobacterial soil-crust lichen *Collema tenax* from arid lands in southern Utah, USA: role of water content on light and temperature responses of CO₂ exchange. *Functional Ecology*, 1998, 12(2):195—202.
- [26] Malek E, McCurdy G, Giles B. Dew contribution to the annual water balances in semi-arid desert valleys. *Journal of Arid Environments*, 1999, 42(2):71—80.
- [27] Ninari N, Berliner P R. The role of dew in the water and heat balance of bare loess soil in the Negev Desert: quantifying the actual dew deposition on the soil surface. *Atmospheric Research*, 2002, 64(1-4):323—334.
- [28] Yu Q H. Preliminary study on soil coagulation water at Qongkol Region in Northeastern fringe of Tarim Basin, Xinjiang. *Arid Land Geography*, 1992, 15(3):77—84.
- [29] Chen H S, Kang Y H. Condensed vapor and its role in the ecological environment of Shapotou Region. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1992, 6(2):63—72.
- [30] Jiang J, Wang K F, Zhang W J. A study on the coagulation water in the sandy soil and its role in water balance. *Arid Zone Research*, 1993, 10(2):1—9.
- [31] Feng J C, Liu L C, Xiao H L, *et al.* Dynamic measurement and theoretical calculation on water absorption and condensation of sandy soil in Shapotou Region. *Journal of Desert Research*, 1998, 18(1):11—15.
- [32] Fan G G. Experimental research on the formation of condensation water and analyzing its eco-environmental impact. *Journal of Xi'an Engineering University*, 2002, 24(4):63—66.
- [33] Guo Z R, Han S P. Experimental study on the condensation water in arid area, Northwestern China. *Advances in Water Science*, 2002, 13(5):623—628.
- [34] Zhou J L, Akram A, Dong X G. An experimental study on the condensation water in the plain area of the Northern Slope of Tianshan Mountains. *Journal of Xinjiang Agriculture University*, 2002, 25(1):49—53.
- [35] Cao W B, Wan L, Zhou X, *et al.* A preliminary study of the formation mechanism of condensation water and its effects on the ecological environment in northwest China. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2003, 30(2):6—10.
- [36] Zhang J S, Wu Y Q, Li Z. Test and research of precipitation intercepted by groundwater and condensation in Desert Pool of North Area of Shaanxi. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5):124—126.
- [37] Fang J, Ding Y J. Study of the condensation water and its effect factors on the Fringes of Desert Oasis. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(5):755—760.
- [38] Wang Z, Liang X F, Wang D J, *et al.* Experiment Research on soil dew of in the windy beach Area of Ordos. *Ground Water*, 2006, 28(6):28—31.
- [39] Sun Z Y, Yu S W, Zhou A G, *et al.* Experimental study on the condensation water in Lop Nur Region, Xinjiang. *Geological Science and Technology Information*, 2008, 27(2):91—96.
- [40] Guo Z R, Liu J H. An overview on soil condensate in Arid and Semiarid Regions in China. *Arid Zone Research*, 2005, 22(4):576—580.
- [41] Zhuang Y L, Zhao W Z. Advances in the condensation water of Arid Regions. *Advance in Earth Sciences*, 2008(1):31—38.
- [42] Wang X Q, Zhang Y M, Wang Y C, *et al.* Eco-environment change of biological crusts on longitudinal dune surface in Gurbantunggut Desert. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(5):711—716.
- [43] Zhang Y M, Chen J, Wang X Q, *et al.* The distribution patterns of biological soil crust in Gurbantunggut Desert. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1):53—60.
- [44] Zhang Y M, Pan H X, Pan B R. Distribution characteristics of biological crust on sand dune surface in Gurbantunggut Desert, Xinjiang. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(4):61—64.
- [45] Zhang Y M, Cao T, Pan B R. A review on the studies of bryophyte ecology in Arid and Semi-arid areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7):1129—1134.
- [46] Tuba Z, Csintalan Z, Proctor M C F. Photosynthetic responses of a moss, *Tortula ruralis*, ssp. *ruralis*, and the lichens *Cladonia convoluta* and *C. furcata* to water deficit and short periods of desiccation, and their ecophysiological significance: A baseline study at present-day CO₂ concentration. *New Phytologist*, 1996, 133(2):353—361.
- [47] Belnap J, Büdel B. and Lange O L. Biological Soil Crusts: Characteristics and Distribution. In: Belnap, J. & Lange, O. L. eds. *Biological Soil*

- Crusts: Structure, Function, and Management. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2001. 3—30.
- [48] Csintalan Z, Takacs Z, Proctor M C F, *et al.* Early morning photosynthesis of the moss *Tortula ruralis* following summer dew fall in a Hungarian temperate dry sandy grassland. *Plant Ecology*, 2000, 151(1):51—54.
- [49] Abdulla A, Anwar T. Species composition and distribution of lichens in soil crust in southern fringe of Gurbantunggut Desert in Xinjiang. *Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition)*, 2006, 23(4):379—383.
- [50] Rogers R W. Lichens of Hot Arid and Semi-arid Lands. In: Seaward, M. R. D. eds. *Lichen Ecology*. Academic Press, London, New York, San Francisco, 1977. 211—252.
- [51] Lange O L, Kidron G J, Budel B, *et al.* Taxonomic composition and photosynthetic characteristics of the ‘biological soil crusts’ covering sand dunes in the western Negev Desert. *Functional Ecology*, 1992, 6:519—527.
- [52] Zhang Y M. The microstructure and formation of biological soil crusts in their early developmental stage. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(1):42—47.
- [53] Hu C X, Liu Y D. Soil algal biomass and its influential factors in desert soil crusts. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2):284—291.
- [54] Zhong Z P, Shi D J. Differentiation of Hormogonia from filamentous cyanobacteria and their regulation mechanisms. *Chinese Bulletin of Botany*, 2000, 17(3):204—210.
- [55] Booth W E. Algae as pioneers in plant succession and their importance in erosion control. *Ecology*, 1941, 22(1):38—46.
- [56] Verrecchia E, Yair A, Kidron G J, *et al.* Physical-properties of the psammophile cryptogamic crust and their consequences to the water regime of sandy soils, North-western Negev Desert, Israel. *Journal of Arid Environments*, 1995, 29(4):427—437.
- [57] Chen L Z, Liu Y D, Song L R. The function of exopolysaccharides of *Microcoleus* in the formation of Desert Soil. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, 26(2):155—159.
- [58] Eldridge D J. Biological Soil Crusts and Water Relations in Australian Deserts. In: Belnap J & Lange O L eds. *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2001. 315—326.

参考文献:

- [28] 于庆和. 塔里木盆地北东缘群克地区土壤凝结水的初步研究. *干旱区地理*, 1992, 15(3):77~84.
- [29] 陈荷生, 康跃虎. 沙坡头地区凝结水及其在生态环境中的意义. *干旱区资源与环境*, 1992, 6(2):63~72.
- [30] 蒋瑾, 王康富, 张维静. 沙地凝结水及其在水分平衡中作用的研究. *干旱区研究*, 1993, 10:1~7.
- [31] 冯金朝, 刘立超, 肖洪浪, 等. 沙坡头地区土壤水分吸湿凝结的动态观测与理论计算. *中国沙漠*, 1998, 18(1):11~15.
- [32] 范高功. 凝结水形成的试验研究及生态环境效应分析. *西安工程学院学报*, 2002, 24(4):63~66.
- [33] 郭占荣, 韩双平. 西北干旱地区凝结水试验研究. *水科学进展*, 2002, 13(5):623~628.
- [34] 周金龙, 艾克日木·阿不都拉, 董新光. 天山北麓平原区凝结水的观测试验分析. *新疆农业大学学报*, 2002, 25(1):49~53.
- [35] 曹文炳, 万力, 周训, 等. 西北地区沙丘凝结水形成机制及对生态环境影响初步探讨. *水文地质工程地质*, 2003, 30(2):6~10.
- [36] 张建山, 仵彦卿, 李哲. 陕北沙漠滩区降水入渗与凝结水补给机理试验研究. *水土保持学报*, 2005, 19(5):124~126.
- [37] 方静, 丁永建. 荒漠绿洲边缘凝结水量及其影响因素. *冰川冻土*, 2005, 27(5):755~760.
- [38] 王哲, 梁煦枫, 王德建, 等. 鄂尔多斯风沙滩地区土壤凝结水试验研究. *地下水*, 2006, 28(6):28~31.
- [39] 孙自永, 余绍文, 周爱国, 等. 新疆罗布泊地区凝结水试验. *地质科技情报*, 2008, 27(2):91~96.
- [40] 郭占荣, 刘建辉. 中国干旱半干旱地区土壤凝结水研究综述. *干旱区研究*, 2005, 22(4):576~580.
- [41] 庄艳丽, 赵文智. 干旱区凝结水研究进展. *地球科学进展*, 2008, 1:31~38.
- [42] 王雪芹, 张元明, 王远超, 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮小尺度分异的环境特征. *中国沙漠*, 2006, 26(5):711~716.
- [43] 张元明, 陈晋, 王雪芹, 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮的分布特征. *地理学报*, 2005, 60(1):53~60.
- [44] 张元明, 潘惠霞, 潘伯荣. 古尔班通古特沙漠不同地貌部位生物结皮的选择性分布. *水土保持学报*, 2004, 18(4):61~64.
- [45] 张元明, 曹同, 潘伯荣. 干旱与半干旱地区苔藓植物生态学研究综述. *生态学报*, 2002, 22(7):1129~1134.
- [49] 阿不都拉·阿巴斯, 艾尼瓦尔·吐米尔. 新疆古尔班通古特沙漠南缘土壤生物结皮中地衣植物物种组成和分布. *新疆大学学报:自然科学版*, 2006, 23(4):379~383.
- [52] 张元明. 荒漠地表生物土壤结皮的微结构及其早期发育特征. *科学通报*, 2005, 50(1):42~47.
- [53] 胡春香, 刘永定. 土壤藻生物量及其在荒漠结皮的影响因子. *生态学报*, 2003, 23(2):284~291.
- [54] 钟泽璞, 施定基. 丝状体蓝藻藻殖段的分化及其调节机制. *植物学通报*, 2000, 17(3):204~210.
- [57] 陈兰周, 刘永定, 宋立荣. 微鞘藻胞外多糖在沙漠土壤成土中的作用. *水生生物学报*, 2002, 26(2):155~159.