

沙坡头地区吸湿凝结水对生物土壤结皮的生态作用*

潘颜霞 王新平** 张亚峰 虎 瑞

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠试验研究站,兰州 730000)

摘 要 以沙坡头植被固沙区为研究对象,采用野外试验与室内分析相结合的方法,探讨了吸湿凝结水对生物土壤结皮的生态作用。结果表明:在沙坡头人工固沙植被区内,吸湿凝结水90%分布在表层3 cm以内,不影响土壤表层水分含量;夜间形成的吸湿凝结水在日间参与了地表水分与大气层水汽的交换过程,弥补了日间蒸发作用导致的土壤水分的散失,使表层土壤水分不会迅速降低。吸湿凝结水形成量与生物土壤结皮中的叶绿素含量呈正相关关系,能够提高该区生物土壤结皮的生长活性,有利于其生物量的积累。

关键词 吸湿凝结水 生物土壤结皮 生物量 水分含量 沙坡头

文章编号 1001-9332(2013)03-0653-06 中图分类号 Q948.1 文献标识码 A

Ecological effect of hygroscopic and condensate water on biological soil crusts in Shapotou region of China. PAN Yan-xia, WANG Xin-ping, ZHANG Ya-feng, HU Rui (*Shapotou Desert Experimental Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*). *-Chin. J. Appl. Ecol.*, 2013, 24(3): 653-658.

Abstract: By the method of field experiment combined with laboratory analysis, this paper studied the ecological significance of hygroscopic and condensate water on the biological soil crusts in the vegetation sand-fixing area in Shapotou region of China. In the study area, 90% of hygroscopic and condensate water was within the 3 cm soil depth, which didn't affect the surface soil water content. The hygroscopic and condensate water generated at night involved in the exchange process of soil surface water and atmosphere water vapor, made up the loss of soil water due to the evaporation during the day, and made the surface soil water not reduced rapidly. The amount of the generated hygroscopic and condensate water had a positive correlation with the chlorophyll content of biological soil crusts, indicating that the hygroscopic and condensate water could improve the growth activity of the biological soil crusts, and thus, benefit the biomass accumulation of the crusts.

Key words: hygroscopic and condensate water; biological soil crust; biomass; water content; Shapotou.

在干旱荒漠地区,水分是制约生态格局和过程的关键非生物限制因子^[1]。然而该类型区域普遍存在一种自然现象:即使经历长时间干旱状态,仍有荒漠植物和动物存活,说明期间一定存在其他的水分来源。大量研究表明,吸湿凝结水是干旱荒漠区除降雨以外的一种重要水分来源^[2-4]。在以色列内盖夫沙漠腹地 Avdat 地区,平均每年有 195 d 会生成凝结水,年生成总量约 33 mm^[5]。而在美国的大西洋中

部地区 9 月 27 日至 11 月 6 日,日凝结水量占草莓地日蒸散量的 33%^[6]。

生物土壤结皮(biological soil crust, BSC)由于具有忍受干旱和高温的能力,成为干旱半干旱荒漠地表的重要覆盖类型^[7],是生态系统碳、氮输入的主要途径,为植被生长提供了充足的养分^[8]。BSC 的碳、氮固定能力依赖于其光合活性^[9],但水热条件的联合限制对生物土壤结皮是致命的。因此,凝结水的存在对干旱环境下 BSC 的光合作用有重要意义。干旱地区的 BSC 能够通过其生物体结构吸收凝结水用于自身光合作用。如蓝藻组成的 BSC 能够吸收大于 0.1 mm 的凝结水,在干旱状态下仍能保持

* 国家自然科学基金项目(41201085)、中国科学院“百人计划”项目“固沙植被系统生态水文学研究”和中国科学院寒区旱区环境与工程研究所人才基金项目(Y184A21001)资助。

** 通讯作者。E-mail: xpwang@zb.ac.cn
2012-08-15 收稿, 2012-12-27 接受。

其生物活性^[10]. 藻丝及其分泌物是 BSC 吸收和保持水分的主要器官, 而且干旱死亡之后的藻体仍具有一定的吸水作用^[11]. 沙漠地区的凝胶状地衣 *Collema* 能够吸收超出其干质量 36 倍的凝结水量^[12]; 苔藓结皮也能够吸附凝结水用于自身的光合作用, 土生墙藓吸收凝结水后 3 min 就可以进行光合作用, 30 min 后其光合速率可恢复到正常状态^[13], 日出后 1.5 h 仍可吸收 CO₂^[14]; 同时, 凝结水还有利于减缓长期干旱对植物体细胞和光合器官造成的损害, 使苔藓的 PS II 最大光化学效率和荧光降低率迅速恢复^[13].

在腾格里沙漠东南缘的沙坡头地区, 人工固沙植被经过 50 多年的演变, BSC 已成为植被组成的重要成分之一, 使沙丘表层成土过程愈加明显, 进而影响到降水的再分配, 导致灌木群落向草本和隐花植物(蓝藻、绿藻、地衣、苔藓)为优势的群落演替. 植被的这种演变, 使浅根系植物在其组成中的比例增加, 特别是该区年均降水量仅 180 mm, 且年内分布不均^[7], 一年中大部分时间处于干旱状态. 而隐花植物构成的 BSC 的存在有利于表层水分的蒸发, 加上大量浅根系草本植物对水分的利用, 导致土壤表层水分含量极低. 然而, 固沙植被区却能维持相对稳定的草本植物盖度, 并繁衍大量 BSC. 除了有限的降水补充浅层土壤含水量外, 吸湿凝结水是否在维系固沙区浅层水分含量和支撑 BSC 覆盖中起着重要作用尚需深入探讨. 量化凝结水对固沙植被区 BSC 生存的贡献是全面解析固沙植被水文过程的重要科学问题, 能够为我国干旱区生态恢复中水资源合理利用与植被的合理建设提供科学依据. 本文采用野外测定和室内分析相结合的方法, 研究了沙坡头人工固沙植被区凝结水生成量与 BSC 生物量和水分含量的关系, 探讨了凝结水对该区水量平衡的影响, 以期量化凝结水在该区的生态贡献, 为水文模型的正确构建和区域植被恢复提供数据和理论支持.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于腾格里沙漠东南缘的沙坡头地区(37°32' N, 105°02' E), 是荒漠化草原向草原化荒漠的过渡区, 也是沙漠与绿洲的过渡区^[15-16]. 该区海拔 1339 m, 格状新月形沙丘由西北向东南倾斜, 呈阶梯状分布. 受蒙古高气压的影响, 该区寒冷干燥、多西北风, 年均风速 2.9 m·s⁻¹, 夏秋降水集中, 兼有大陆性气候和季风降雨的特点; 年均气温 9.6

℃, 低温极值 -25.1℃, 高温极值 38.1℃, 年日照时数 3264 h, 年均降水量仅 186 mm, 年潜在蒸发量高达 2900 mm, 沙地土壤浅层含水量在 2%~5%^[17]; 地下水埋深 80 m, 不能为植物直接利用.

为了确保包兰铁路沙坡头沙漠地段的畅通无阻, 中国沙漠科学工作者于 1956 年相继建立了“以固为主, 固阻结合”的植被固沙防护体系. 首先在流动沙丘上垂直于主风的方向扎设阻沙栅栏, 然后在阻沙栅栏扎设 1 m×1 m 的麦草方格作为固沙屏障, 在无灌溉条件下栽植柠条(*Caragana korshinskii*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)、沙拐枣(*Calligonum arborescens*)和沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)等旱生灌木, 其株距与行距为 1 m×2 m 或 2 m×3 m, 逐年实施. 目前在铁路北侧和南侧建立了宽度分别为 500 和 200 m 的人工植被固沙带, 全长约 16 km. 人工植被区建立后经过 50 余年的演变, 使该地区的生态环境得到了改善, 在人工植被作用下, 流沙成土过程已经开始, 沙层表面土壤微生物结皮层厚度逐年增厚, 伴随着流沙成土过程而大量侵入一些 1 年生植物和苔藓、藻类等隐花植物, 土壤微生物种群数量也大大增加, 大量物种的繁殖和定居, 使原有的流沙演变成稳定复杂的人工-天然荒漠植被景观^[18].

1.2 研究方法

分别用 40 cm×30 cm×5 cm 和 40 cm×30 cm×3 cm、底部密封的水晶盒盛装取于该区 50 年人工固沙植被区的生物土壤结皮, 共取 6 个样品. 取样过程中为了保持样品完整, 在选择区域浇水, 使结皮表面充分湿润; 所取样品在自然条件下 48 h 风干至野外原始水分状况. 将水晶盒放置于赛多利斯天平上(CPA34001S, 量程 34 kg; LA16001S, 量程 16 kg; 精度: ±0.1 g; 托盘型号: 40 cm×30 cm), 安置于与试验土样所对应的样地. 2009 年 9 月 15 日 19:00 至 9 月 30 日 7:00 每 5 s 测定一次土样质量, 连接 Campbell 1000 数采仪, 取 30 min 测定的平均值自动保存于数采仪中. 所有仪器均使用外部电源持续供电.

2009 年 10 月 7 日 19:00 至 10 月 9 日 19:00 将两台放置 40 cm×30 cm×5 cm 水晶盒的天平中的一台, 夜间放置在原始取样位置, 不做任何处理; 另一台夜间用 41 cm×31 cm×30 cm 的水晶罩封闭, 阻止生物土壤结皮与大气之间的水汽交换, 清晨日出前取掉水晶罩. 该试验在无降雨干扰的情况下进行, 以避免降雨的影响.

2009 年 9 月 15—30 日, 测定凝结水形成量的

同时,每天早晨日出前在地貌类型和周围环境一致的地点取 3 块直径 1.2 cm、厚 1 cm 的生物土壤结皮样品,密封带回实验室,充分研磨,用 80% 的丙酮在黑暗条件下提取,滤纸过滤,用分光光度计测量其叶绿素含量,测定方法见《植物生理学实验指导》^[19];同时,用土样盒另取 3 个直径 5 cm 的生物土壤结皮样品,立即称其湿质量,105 °C 烘干后称量,计算结皮的质量含水量,并通过容重换算成体积含水量。

1.3 数据处理

水晶盒装土样单位面积的吸湿凝结量计算公式如下:

$$h = \frac{10 \cdot m}{\rho \cdot a \cdot b}$$

式中: h 为吸湿凝结水量 (mm); m 为一个水晶盒的吸湿凝结量 (g); ρ 为水的密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); a 、 b 分别为水晶盒的长和宽 (cm)。

露点计算公式如下^[20]:

$$DP = [(0.66077 - \lg EW) \times 237.3] / (\lg EW - 8.16077)$$

$$\lg EW = 0.66077 + 7.5T / (237.3 + T) + \lg 10 (RH) - 2$$

式中: T 为当前温度; RH 为相对湿度; DP 为露点。

采用经典统计学方法进行数据分析。试验期间的温度和相对湿度均由沙坡头沙漠试验研究站自动气象站 (Milos 520, Vaisala, 芬兰) 每 5 s 测定一次,取 10 min 平均值记录并存储。

2 结果与讨论

2.1 凝结水形成的气温条件

凝结水形成的前提条件是地表温度等于或低于周围大气层露点温度。2009 年 9 月 23 日 19:00 至 24 日 19:00, 无降雨条件下,沙坡头地区地表温度未降至大气层露点温度以下,土壤表层水分就开始增加(图 1)。这一现象与内盖夫沙漠地区的观测结果一致^[21]。表明在无降雨条件下,土壤表层水分的增加不仅仅是传统意义上凝结水形成的结果,在土壤水分含量极低的情况下,水分吸附过程先于凝结作用发生。试验区土壤表层水分含量低于 2%,土壤孔隙层水分含量显著低于大气层,水分吸附过程在该区扮演重要角色。凝结水形成和水分的吸附过程都是潜热流昼夜循环的结果^[2]。本研究测定的凝结水数量是凝结量和水分吸附量的总和,统称吸湿凝结量。

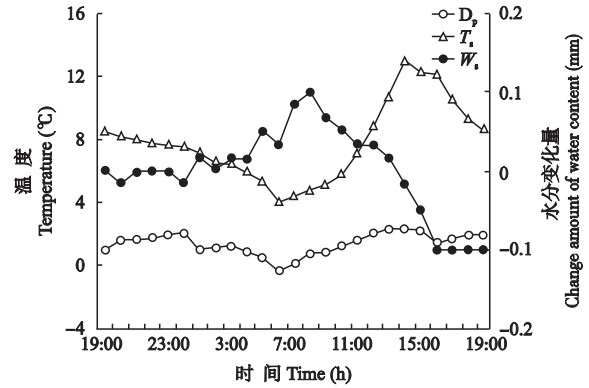


图 1 无降雨条件下研究区土壤表层水分增加时露点 (D_p)、土壤表层温度 (T_s) 和土壤表层水分变化量 (W_s) 的昼夜变化 Fig. 1 Diurnal variations of dew point (D_p), soil surface temperatures (T_s) and change amount of soil surface water contents (W_s) when the soil surface water contents increase under no rainfall condition in study area (2009-09-23—09-24).

2.2 吸湿凝结水对水量平衡和生物土壤结皮层水分含量的影响

蒋谨等^[22]在奈曼地区的研究结果表明,水量平衡计算时对吸湿凝结水的忽略不计会导致水分平衡产生误差。方静^[23]在临泽内陆河流域的研究表明,夜晚生成的吸湿凝结水未能减缓或改变白天由于蒸发引起的土壤水分减少趋势,吸湿凝结水对研究区土壤水量平衡的作用不明显。在沙坡头地区人工植被建植过程中,地表特征的改变将引起表层吸湿和蒸发过程的变化,可能导致吸湿凝结水在该区水量平衡中的作用发生改变。

由图 2 可以看出,试验区自然开放状态下,生物土壤结皮表层夜间有吸湿凝结水生成,且吸湿凝结水量在 7:00—8:00 迅速增加,由于该时段的地表温度最接近甚至低于露点温度,有利于吸湿凝结水的生成;随后,吸湿凝结水生成量开始下降,但由于夜间生成的吸湿凝结水的影响,生物土壤结皮表层水分在白天不会迅速减少,而是存在缓慢的蒸发过程,吸湿凝结水的存在弥补了其表层水分的蒸发散失,使生物土壤结皮表层水分含量不会迅速降低。夜间水晶罩的封闭作用阻止了生物土壤结皮表层与大气层的水汽交换,阻碍了吸湿凝结过程的发生;生物土壤结皮封闭后,水晶罩内少量空气与生物土壤结皮表层的温度差使吸湿凝结过程仍然发生,但由于水晶罩内有限的水汽供应,其吸湿凝结水生成量少于自然状态下的生物土壤结皮,这些水分在 9:00 左右迅速蒸发,生物土壤结皮内原有的土壤水分也被部分蒸发掉,使其表层水分低于前一天吸湿凝结水生成之前的水分含量。在无降雨条件下,如果夜间没有

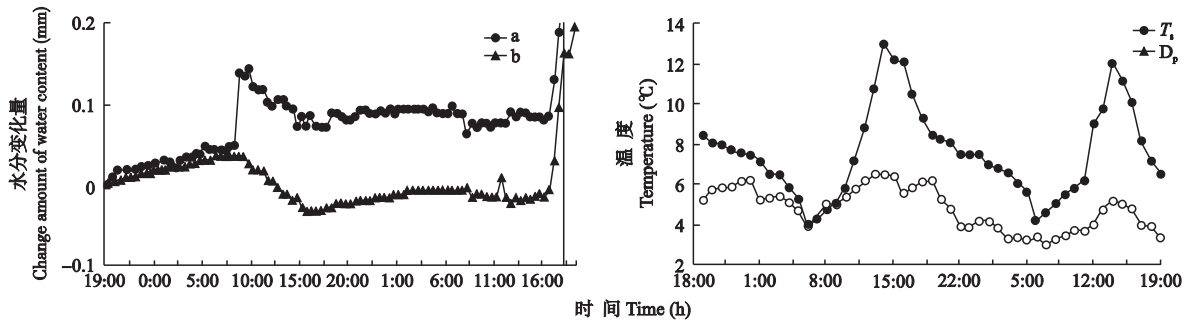


图2 自然状态 (a) 和夜间封闭状态 (b) 下生物土壤结皮表层水分变化量以及地温和露点温度的变化 (2009-10-07-10-09)

Fig. 2 Variations of soil surface temperature and dew point, as well as the change amount of soil surface water content of biological soil crust under the condition of nature (a) and close down at night (b) (2009-10-07-10-09).

吸湿凝结水的补充,生物土壤结皮表层的水分会由于日间蒸发作用而一直降低.自然开放状态下,10月9日17:00,地表温度(2.3℃)降至露点温度(3.1℃)以下,生物土壤结皮表层开始吸湿凝结作用,表层水分开始迅速增加.以上观测表明,沙坡头地区夜间生成的吸湿凝结水在日出后的蒸发过程中能够弥补土壤表层水分的散失,有利于生物土壤结皮表层水分的保持,是表层水分在旱季不会无限降低的主要原因.

试验期间生物土壤结皮表层吸湿凝结水生成量与表层5cm水分含量的关系表明(图3)吸湿凝结水不影响整个生物土壤结皮层水分含量的变化,该区吸湿凝结水对土壤层水储量的变化无影响.方静和丁永建^[24]在临泽荒漠绿洲边缘地区的研究表明,0~10cm的沙层中可以观测到吸湿凝结水,但吸湿凝结量主要集中在地表0~2cm;陈荷生和康跃虎^[25]在沙坡头地区的研究指出,表层0~3cm是吸湿凝结水的主要生成层.本文比较了沙坡头地区生物土壤结皮形成后表层3和5cm吸湿凝结水的形

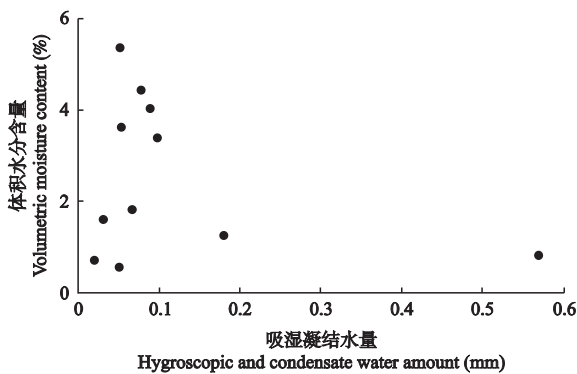


图3 研究区吸湿凝结水量与生物土壤结皮体积水分含量的关系

Fig. 3 Relationship between the hygroscopic and condensate water amount and biological soil crusts volumetric moisture content in the study area.

成特征,结果(图4)表明,该区生物土壤结皮表层3和5cm深度吸湿凝结水的形成量差别不大.夜间吸湿凝结水量分别为0.08和0.09mm,0~3cm层的吸湿凝结水量约占0~5cm层的90%,但0~3cm层是土壤蒸发的活跃层,大部分夜间形成的吸湿凝结水均在日间参与到土壤蒸发过程中,对土壤内水分储量的作用不大.

2.3 吸湿凝结水对生物土壤结皮生物量的影响

由蓝绿藻和其他细菌、藻类、地衣、真菌、苔藓组成的微生物结皮在世界沙漠地区均有广泛分布.其可利用数量较少的吸湿凝结水,在干旱状态下仍能保持其生物活性.有研究表明,藻类结皮可以利用少量水分进行光合作用^[25],苔藓结皮能够利用干旱时期的吸湿凝结水完成授精和孢子体的形成^[26].

由于结皮叶绿素含量与年内水分机制之间的密切关系,叶绿素含量可以作为结皮生长条件评价的可靠指示剂^[27].沙层表面的稳定性、水持力和生态系统碳氮输入等在很大程度上都取决于结皮中的叶绿素含量^[28].Kidron等^[29]研究结果表明,吸湿凝结

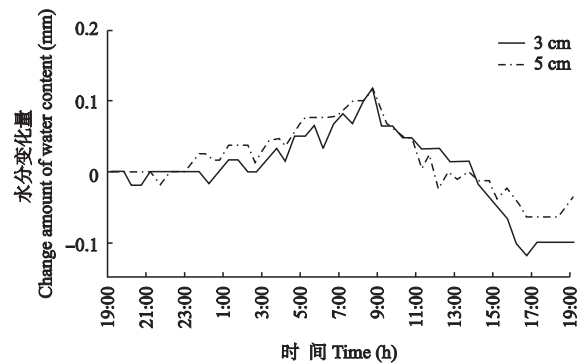


图4 生物土壤结皮表层3和5cm深度吸湿凝结水的形成特征

Fig. 4 Formation characteristics of hygroscopic and condensate water in the depth of 3 and 5 cm of biological soil crust (2009-09-23-09-24).

水湿润期间 结皮厚度与叶绿素含量呈显著线性相关 结皮盖度与叶绿素含量则未达显著相关水平. Danin 等^[30-31]认为,较高的粘粉粒含量可以提高结皮生物量.

在 2009 年 9 月 15—30 日吸湿凝结水形成比较明显的时期,对每天日出前生物土壤结皮的叶绿体色素含量进行测定.期间,该区生物土壤结皮表层吸湿凝结水量在 0.02~0.57 mm.其中,仅有 1 次吸湿凝结水量>0.5 mm,1 次在 0.1~0.2 mm,其余时间的吸湿凝结水生成量均<0.1 mm.由图 5 可以看出,研究区生物土壤结皮叶绿体色素含量与日均吸湿凝结水量的变化趋势相同,在吸湿凝结水量较高的早晨,生物土壤结皮中叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量均升高,生物土壤结皮中总叶绿素含量与吸湿凝结水生成量呈正相关关系($R^2=0.69$) (图 6),但与吸湿凝结水量的变化相比,生物土壤结皮中叶绿体色素含量的变化程度较小,如在 9 月 26 日的吸湿凝结水生成量较其他日期有较大增幅,为其余观测日期的 3~30 倍,但该日的叶绿体色素含量并没有显著升高,仅为其他观测日的 1~2 倍.沙坡头地区吸湿凝结水的生成能够提高该区苔藓结皮生长活性,有利于其生物量的积累. Kidron 等^[26]研究指出,吸湿凝结水可能对藻类结皮的生命维持起重要作用;显微镜下苔藓结皮的观测表明,吸湿凝结水有利于其

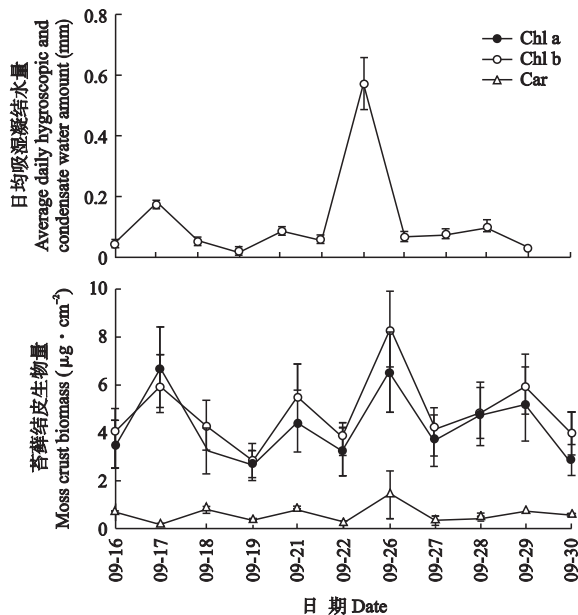


图 5 研究区生物土壤结皮叶绿体色素含量和吸湿凝结水量的变化

Fig. 5 Variation of chloroplast pigment contents of biological soil crusts and hygroscopic and condensate water amounts in study area 2009-09-16—09-30, (n=3).

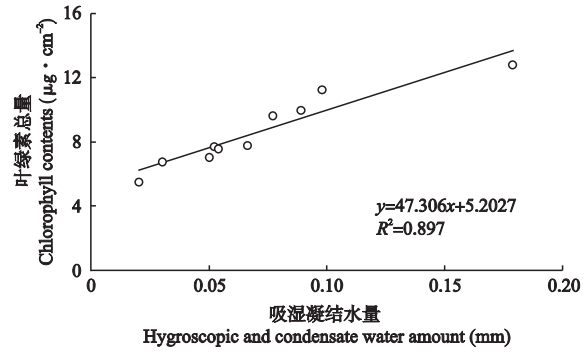


图 6 研究区生物土壤结皮叶绿素总量与吸湿凝结水量的相关性

Fig. 6 Correlation between biological soil crust's chlorophyll content and the hygroscopic and condensate water amount in the study area.

生殖器官的形成,为授精机制和孢子体的形成创造了有利条件,对苔藓结皮的繁殖发育具有重要作用.

3 结 论

吸湿凝结水作为沙坡头地区一种持续、稳定的水源,其 90% 分布在表面 0~3 cm 层,不参与该区的水量平衡计算,对生物土壤结皮层水分含量无影响,但其存在能够弥补日间表层水分的迅速蒸发,提高该区苔藓结皮生长活性,有利于其生物量的积累,对该区生物土壤结皮发育具有重要意义.吸湿凝结水的生态作用是干旱荒漠区生态水文学研究的一个重要方向.本文仅分析了其对生物土壤结皮叶绿素含量和表层水分含量的影响,初步探讨了其生态重要性.另外,由于试验时间较短,本文未能建立具体的关系式来表达吸湿凝结水对生物土壤结皮的作用机制.在以后的研究中还需要进一步测定吸湿凝结水对生物土壤结皮其他生理生态指标的影响,以及对短命-类短命植物的生理生态作用,从而综合评价干旱荒漠区吸湿凝结水的生态作用.

参考文献

[1] Kidron GJ. Analysis of dew precipitation in three habitats within a small arid drainage basin, Negev Highlands, Israel. *Atmospheric Research*, 2000, **55**: 257-270

[2] Agam N, Berlinera PR. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments: A review. *Journal of Arid Environments*, 2006, **65**: 572-590

[3] Kidron GJ. The effect of substrate properties, size, position, sheltering and shading on dew: An experimental approach in the Negev Desert. *Atmospheric Research*, 2010, **98**: 378-386

[4] Munné-Bosch S. Direct foliar absorption of rainfall water and its biological significance in dryland ecosystems.

- Journal of Arid Environments*, 2010, **74**: 417-418
- [5] Evenari M. Ecology of the Negev Desert, a critical review of our knowledge// Shuval H, ed. *Developments in Arid Zone Ecology and Environmental Quality*. Philadelphia, PA: Balaban ISS, 1981: 1-33
- [6] Glenn DM, Feldhake C, Takeda F, et al. The dew component of strawberry evapotranspiration. *Hort-Science*, 1996, **31**: 947-950
- [7] Li X-R (李新荣), Zhang Y-M (张元明), Zhao Y-G (赵允格). A study of biological soil crusts: Recent development, trend and prospect. *Advances in Earth Science (地球科学进展)*, 2009, **24**(1): 11-24 (in Chinese)
- [8] Russow R, Veste M, Böhme F. A natural ¹⁵N approach to determine the biological fixation of atmospheric nitrogen by biological soil crusts of the Negev Desert. *Rapid Communication in Mass Spectrometry*, 2005, **19**: 3451-3456
- [9] Lange OL, Green TGA, Melzer B, et al. Water relations and CO₂ exchange of the terrestrial lichen *Teloschistes capensis* in the Namib fog desert: Measurements during two seasons in the field and under controlled conditions. *Flora*, 2006, **201**: 268-280
- [10] Lange OL, Kidron GJ, Büdel B, et al. Taxonomic composition and photosynthetic characteristics of the biological crusts covering sand dunes in the western Negev. *Functional Ecology*, 1992, **6**: 519-527
- [11] Lan S-B (兰书斌), Hu C-X (胡春香), Rao B-Q (饶本强), et al. Non-rainfall water sources in the topsoil and their changes during formation of man-made algal crusts at the eastern edge of Qubqi Desert, Inner Mongolia. *Scientia Sinica Vitae (中国科学·生命科学)*, 2010, **40**(8): 751-757 (in Chinese)
- [12] Rogers RW. Lichens in hot arid and semi-arid lands// Seaward MRD, ed. *Lichen Ecology*. New York: Academic Press, 1977: 211-252
- [13] Tuba Z, Csintalan Z, Proctor MCF. 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**: 353-361
- [14] Csintalan Z, Takács Z, Proctor MCF, et al. Early morning photosynthesis of the moss *Tortula ruralis* following summer dew fall in a Hungarian temperate dry sandy grassland. *Vegetatio*, 2000, **151**: 51-54
- [15] Li XR, Chen YW, Su YG, et al. Effects of biological soil crust on desert insect diversity: Evidence from the Tengger Desert of northern China. *Arid Land Research and Management*, 2006, **20**: 1-18
- [16] Chen J-F (陈进福), Li X-R (李新荣), Chen Y-W (陈应武), et al. Effect of soil microbiotic crust on desert insect diversity. *Journal of Desert Research (中国沙漠)*, 2006, **26**(6): 986-992 (in Chinese)
- [17] Li X-R (李新荣), Chen Y-W (陈应武), Jia R-L (贾荣亮). Biological soil crusts: A significant food source for insects in the arid desert ecosystems. *Journal of Desert Research (中国沙漠)*, 2008, **28**(2): 245-248 (in Chinese)
- [18] Wang X-P (王新平), Li X-R (李新荣), Xiao H-L (肖洪浪), et al. Evolution characteristics of the artificially re-vegetated shrub ecosystem of arid and semi-arid sand dune area. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2006, **25**(8): 1974-1980 (in Chinese)
- [19] Zhang Z-A (张治安), Zhang M-S (张美善), Wei R-H (蔚荣海). *Plant Physiology Experiments Guidance*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004 (in Chinese)
- [20] Jiang L-X (姜连祥), Xu P-P (许培培). The sensing system design of temperature and humidity sensor SHT11. *Microcontrollers & Embedded Systems (单片机与嵌入式系统应用)*, 2007(1): 49-51 (in Chinese)
- [21] Agam N, Berliner PR. Diurnal water content changes in the bare soil of a coastal desert. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, **5**: 922-933
- [22] Jiang J (蒋瑾), Wang K-F (王康富), Zhang W-J (张维静). A study on the coagulation water in the sandy soil and its role in water balance. *Arid Zone Research (干旱区研究)*, 1993, **10**(2): 1-9 (in Chinese)
- [23] Fang J (方静). The Mechanism and Ecological Functions of Condensation Water in the Ecotone between Oasis and Desert in Arid Region. PhD Thesis. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2009 (in Chinese)
- [24] Fang J (方静), Ding Y-J (丁永建). Study of the condensation water and its effect factors on the fringes of desert oasis. *Journal of Glaciology and Geocryology (冰川冻土)*, 2005, **27**(5): 755-760 (in Chinese)
- [25] Chen H-S (陈荷生), Kang Y-H (康跃虎). Condensed vapor and its role in the ecological environment of Shapotou region. *Journal of Arid Land Resources & Environment (干旱区资源与环境)*, 1992, **6**(2): 63-72 (in Chinese)
- [26] Kidron GJ, Hernstadt 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
- [27] Kidron GJ, Vonshak A, Abeliovich A. Recovery rates of microbiotic crusts within a dune ecosystem in the Negev Desert. *Geomorphology*, 2008, **100**: 444-452
- [28] Zaadi E, Kuhn U, Wilske B, et al. Patterns of CO₂ exchange in biological soil crusts of successional age. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**: 959-966
- [29] Kidron GJ, Vonshak A, Abeliovich A. Microbiotic crusts as biomarkers for surface stability and wetness duration in the Negev Desert. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, **34**: 1594-1604
- [30] Danin A. Plant species diversity and plant succession in a sandy area in the northern Negev. *Flora*, 1978, **167**: 409-422
- [31] Danin A, Bar-Or Y, Dor I, et al. The role of cyanobacteria in stabilizing of sand dunes in southern Israel. *Ecologia Mediterranea*, 1989, **15**: 55-64

作者简介 潘颜霞,女,1981年生,博士,助理研究员.主要从事干旱区生态水文学研究,发表论文20余篇. E-mail: panyanxia@gmail.com

责任编辑 杨弘