

## 库布齐沙漠北缘沙丘不同部位露水凝结量的初步研究\*

武文<sup>1</sup>, 于显威<sup>2</sup>, 杨晓晖<sup>1</sup>, 于春堂<sup>1</sup>, 卢晓杰<sup>3</sup>

(1. 中国林业科学研究院 林业研究所 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091; 2. 沈阳农业大学 高等职业技术学院, 沈阳 110122; 3. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

**摘 要:**以库布齐沙漠北缘与黄河河岸之间的生态过渡带为研究对象, 通过每天野外观测沙丘不同部位的露水凝结量来确定小尺度(典型沙丘的坡位)上露水量的空间分布特征及日平均露水凝结量。结果表明, 在库布齐沙漠边缘地区有凝结水存在, 它的形成对维系荒漠化地区植被生态系统的稳定至关重要, 该区的日平均露水凝结量为0.172~0.324 mm, 其中丘间地露水凝结量为0.248~0.377 mm, 阳坡为0.160~0.362 mm, 阴坡为0.170~0.305 mm, 沙丘顶部为0.051~0.272 mm, 而0.03 mm的露水量是微生物对于水利用的最低限度, 可见露水是该区生态系统中不可缺少的生态因子。沙丘不同部位的露水凝结量不同: 露水凝结量从大到小的次序依次为丘间地、阳坡、阴坡、沙丘顶部。同时, 阳坡上、下部位之间露水凝结量的差异要比阴坡上、下部位的差异更加明显。这将为在库布齐沙漠开展露水研究是否可行提供依据, 也为今后人工促进植被恢复提供理论依据和技术支撑。

**关键词:**过渡带; 日平均露水凝结量; 阳坡; 阴坡; 丘间地; 沙丘顶部

中图分类号: S157; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2008)03-0088-05

## Dew-fall in Different Position of Dunes in the Northern Marginal Zone of the Kubuqi Desert

WU Wen-yi<sup>1</sup>, YU Xian-wei<sup>2</sup>, YANG Xiao-hui<sup>1</sup>, YU Chun-tang<sup>1</sup>, LU Xiao-jie<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Forestry Bureau on Cultivating Trees, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Higher Professional Technology Institute of Shenyang Agricultural University, Shenyang 110122, China; 3. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A measurement program was carried out with a sand dune belt situated in between the northern Kubuqi desert and riverside of the Yellow River, to measure daily amount of dew deposition during the dew formation for different parts of sand dune. Then we can determine the character of distribution of the amounts of dew in fine scale. The measurement showed that the daily amount of dew ranged between 0.172 mm/night and 0.324 mm/night and the amount of dew ranged within the four parts of sand dune are 0.248~0.377 mm in interdune area, 0.160~0.362 mm in sun shaded slope, 0.17~0.305 mm in shady slope and 0.051~0.272 mm in the top of sand dune respectively. A value of 0.03 mm, which also marks the threshold for dew availability for microorganisms, was taken as a threshold for dew. So, dew as a ecological factor in arid and semi arid ecosystems is indispensable. There is a different quantities of dew-fall in dissimilar part of sand dune. The results showed that the order of the dew-fall quantities from high to low was interdune area> sun shaded slope> shady slope> the top of sand dune. At the same time, the daily amount of dew in sun shaded slope is more variable than in shady slope between the the upper position and the lower position the slope.

**Key words:** ecotone; the daily amount of dew-fall; sun shaded slope; shady slope; interdune area; the top of sand dune

### 1 引言

我国是世界上荒漠化危害最严重的国家之一, 近年来沙质荒漠化土地平均每年以3426 km<sup>2</sup>的速度扩展<sup>[1]</sup>, 并且我国的绿洲和沙漠相间分布, 水是绿洲形成的一个关键因子, 而露水在这个系统中起到了一定的作用, 对干旱区生态系统

及水文的平衡有着不容忽视的影响。露水作为一个生态因子, 是一种不可忽视的凝结水资源。一方面可被植物叶片直接吸收而降低其内部水分亏缺, 降低叶片蒸腾的水分损失, 改善植物的水分状态, 另一方面, 露水可直接凝结在土壤表面或当露水浓重时, 露滴可由植株表面滴落到土壤中, 参与

\* 收稿日期: 2007-12-14

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2006BAD26B05)

作者简介: 武文一(1982-), 男, 山西省榆次人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: wuwenyi001@163.com

通信作者: 杨晓晖(1968-), 男, 副研究员, 主要从事景观生态和荒漠化防治研究。E-mail: yangxh@forestry.ac.cn

土壤水分平衡过程。露水在植物生长过程中扮演着重要的角色,对干旱地区的植物生长具有非常重要的意义。在水资源十分短缺的沙漠生态系统中,露水为沙漠中的植物、动物和生物结皮提供重要水源<sup>[2-3]</sup>。它可以提供一些植物特别是一年生浅根性土著植物生存所需要的最起码的水分条件,是一些耐旱植物赖以生存的“命脉”<sup>[4]</sup>,也是影响沙漠生态系统的水热循环规律的重要因子。它弥补了蒸发损耗,减少蒸发支出的“赤字”,这也是土壤层湿度在一定时间内,在一定深度中基本稳定的原因。凝结水的形成减少了土壤水分蒸发损耗,而土壤水和地下水又处于一个相互转化的有机系统中,因此,也就减少了地下水的损耗<sup>[4-5]</sup>。同时由于生物结皮可以显著提高土壤的抗蚀性,有助于沙丘的稳定,所以露水对于沙丘的稳定也起了重要的作用<sup>[2-3]</sup>。

尽管露水在沙漠生态系统中发挥着十分重要的作用,但有关这方面的专题研究尚不多见。国外最早的研究始于 20 世纪 30 年代<sup>[6]</sup>。此后许多科学家从不同角度对露水进行过研究,Duvedevani, Ashbel, Gilad 和 Rosenan, Evenari, Zangvil 和 Druian 等人对露水进行了长期的观测。最近 Jacobs, Kidron, Ninari, Zangvil 等人主要在内盖夫沙漠( Negev Desert)对露水进行了研究。从目前看来,这些研究大多集中在定量测定或估算露水的方法及其对区域水热平衡的影响上。

国内有关沙漠凝结水特别是露水的研究基本处于起步阶段。我国学者在 20 世纪 60 年代已经开始对沙地凝结水特征进行研究<sup>[7]</sup>。但随后的几十年内,仅有零星的研究报道<sup>[5]</sup>,近年来国内学者逐渐关注起沙漠地区凝结水的研究。令人遗憾的是,有关露水在沙漠的空间(如小尺度上沙丘的不同部位)分布特征研究几乎没有。因此借鉴国外有关露水研究的一些相对成熟的理论和方法,在我国的沙漠区开展露水的空间分布及其对沙漠生态系统中植物影响的研究,将有助于我们更加完整准确地把握沙漠生态系统的水热循环规律,进而明确其与植物间的耦合机制,为人工促进植被恢复及防沙、治沙提供理论依据和技术支撑。

选取库布齐沙漠北缘与黄河河岸之间生态过渡带的沙丘作为研究对象,对其不同部位的露水凝结量进行研究,旨在初步探索该区露水凝结量的大小和露水在沙丘上的空间分布特征。本次研究仅为初步研究,其主要目的是探讨露水研究在该区域的可行性,同时为后续深入开展露水研究,收集、提供基础数据和实地调查资料。为今后制定露水的研究方向和研究内容提供参考资料和建议。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

库布齐沙漠位于内蒙古鄂尔多斯高原北部,紧靠黄河平原区,呈东西带状分布。研究区位于库布齐沙漠北缘与黄河河岸之间的生态过渡带,实验点布设在库布齐沙漠边缘靠近黄河滩地的区域,行政上属内蒙古自治区鄂尔多斯市杭锦旗独贵塔拉,海拔 1 020 m 左右,地形起伏不大。该地区多年平均气温 5.6℃,1 月平均气温 - 12.2℃,7 月平均气温 21.4℃;年平均降水 230 mm,全年的降水量分布很不均匀,以 1 月和 12 月最少,降水主要集中在每年的 7- 9 月,其中

多年的最大月平均降水量在 8 月,为 82.1 mm,最低 12 月为 1.1 mm<sup>[8]</sup>,年蒸发量约 2 450 mm;地下水储量 14.2 亿 m<sup>3</sup>,可开采量为 2.73 亿 m<sup>3</sup>,补给模数为 3 万 m<sup>3</sup>,平均水埋深 6.25 m,研究区水埋深 1~ 5 m。地表水补给源主要来自黄河;年平均风速 4 m/s 左右,年均大风日数 50 d 左右,年沙尘暴日数约 27 d,年扬沙日数约 41 d,风沙危害极为严重。故该区的气候特征表现为干旱、少雨、风多、昼夜温差大,属典型的干旱区和半荒漠化草原区(图 1)。

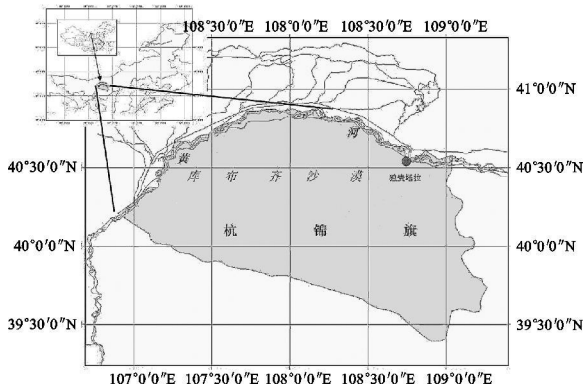


图 1 研究区概况

2.2 研究方法

试验于 2005 年 8 月中、下旬风力较小且天气晴朗的情况下进行野外观测。该时期降雨量较为集中,空气中的水汽含量高,昼夜温差大,贴地层附近气温易降到露点以下,且傍晚静风频率高,所以傍晚无降雨过程时露极易形成。因此,选取这一期间进行实验,既考虑到露水在这一时期比较丰富,又避免风力过大对露水凝结造成的负面影响。选取具有典型代表性的 2 个平行的沙丘断面及丘间地带作为研究对象,在沙丘的下部、中部和顶部及丘间带分别布设观测点(图 2)。测量露水选用的仪器为目前露水研究中最常用的微型蒸散仪( micro lysimeter)<sup>[2,3,9]</sup>。在每个点上放置一个微型蒸散仪,通过每天日落后和第 2 天日出前分别对微型蒸散仪称重来确定夜间露水的凝结量和白天水分的蒸发量。观测的结果,可一定程度上反映多雨条件下露水凝结情况。该时期正值植物生长的需水时期,所以其意义极为重要<sup>[7]</sup>。

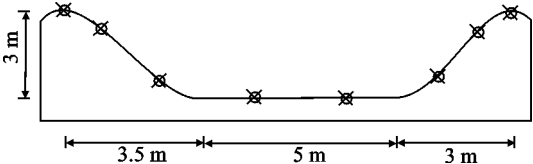


图 2 观测点位分布

3 结果与分析

3.1 露水在沙丘不同部位的分布特征

在 17 d 的露水观测中,无连阴天气出现,雨多在白天开始,傍晚结束。为尽量测出正常天气状况下的露水凝结量,排除降雨及风力的干扰,在下雨当天不进行测量,下雨后第 2 天傍晚开始测量;同时也考虑风力因素,在风力较小的天气状况下进行。因此,沙丘不同部位露水凝结量的差异主要是由于地形条件及植被覆盖等差异造成的。由图 3 可以看

出夜间露水凝结量各部分的均值由高到低依次为丘间地、阳坡、阴坡、丘顶。

丘间地露水凝结量高的原因可能是: ①丘间地植被相对于阴坡要少, 有些地方有裸沙, 动物活动被破坏, 导致丘间地几乎没有生物结皮。由于失去了植被对辐射的阻挡作用, 白天有较多的太阳辐射到达地表, 夜间土壤又发射长波有效辐射使地表气温下降快于沙丘两侧的地表气温。随着地表气温的降低, 空气含水汽的能力减小。当地表空气温度降到露点以下时, 与地表接触的空气中的水汽就在地表凝结成露水。这就使得丘间地形成露水的时间早于沙丘两侧。②由于夜间沙丘两侧长波辐射冷却, 其表层的空气温度降低很快, 而处于同一高度的丘间地上方的空气由于离地面较远, 冷却较慢, 因而产生由沙丘两侧指向丘间地的气压梯度力, 下层风由沙丘两侧吹向丘间地, 并在丘间地盛行。微风可使贴近地面的空气得到不断更新, 保证有足够多的水汽供应凝结, 这可能是丘间地露水凝结量较大的一个原因。

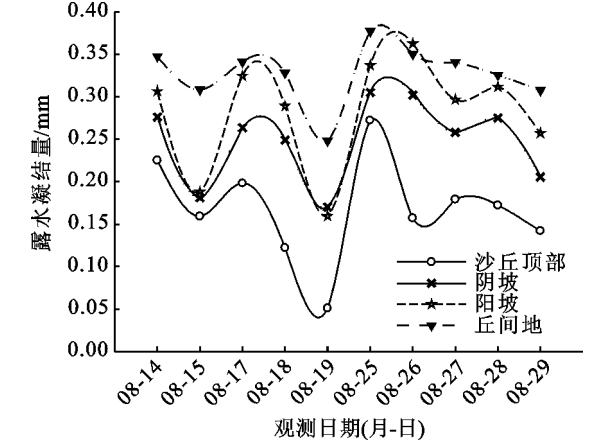


图 3 沙丘不同部位的露水凝结量

由图 3 可以看出, 阳坡露水凝结量多于阴坡。实验时发现阳坡比阴坡缓些, 坡度的差异可能是导致阳坡露水凝结量多于阴坡的一个原因<sup>[2, 10]</sup>。另外, 阴坡植被盖度大于阳坡, 由于植被对太阳辐射的反射和吸收作用使得白天到达阴坡的太阳辐射少, 而夜间植被又削弱了土壤发射的长波有效辐射, 减缓了地表气温的下降, 不易于露水的形成。相反, 白天到达阳坡的太阳辐射多于阴坡, 同时阳坡的植被少于阴坡, 导致了阳坡的长波辐射作用较为强烈, 使得其表面气温下降快于阴坡, 所以形成露水要早于阴坡, 露水凝结量多于阴坡。阳坡露水凝结量比阴坡多的另一个原因是, 阳坡的土壤比阴坡干燥。干燥土壤有利于凝结水发生, 干燥沙性土壤(沙丘、沙地)更有利于凝结水发生<sup>[4]</sup>。因为, 干燥土壤相对于湿润土壤, 导热率低, 下部热量向上传递速度缓慢, 土壤表面温度下降得快, 容易达到露点。由于该研究区处于库布齐沙漠北缘与黄河河岸之间的生态过渡带, 沙丘的走向大致为东北、西南走向, 观测期间的风向多为西南风或南风, 迎风坡多为阳坡。因此, 来自于黄河的风携带的水汽将首先在迎风面凝结成露水, 这也可能是阳坡露水凝结量多于阴坡的一个原因。但值得注意的是, 太阳出来后先照射阳坡, 使得阳坡蒸发过程的开始要稍早于阴坡<sup>[2]</sup>, 同时阳坡的水分蒸发速率

也要比阴坡快些<sup>[3]</sup>, 导致了阳坡植物进行光合作用利用水分的时期缩短<sup>[10]</sup>, 可能是阳坡植被少于阴坡的一个原因。

沙丘的顶部露水凝结量相比较而言最少。这与沙丘顶部特殊的气候条件有很大的关系。沙丘顶部风力比其他地方大, 在夜晚也存在较大的风, 不易于露水的凝结。

3.2 阳坡与阴坡上、下部位的露水凝结量差值比较

由图 4 可知, 阳坡上、下部位的露水凝结量差别大于阴坡, 原因可能是阴坡植被盖度大且分布均匀, 而阳坡盖度小且分布不均匀。阳坡植被稀疏, 还有大片的裸沙存在, 下部几乎无植被生长。这主要是由于阳坡蒸发相对于阴坡强烈, 积盐现象较为严重。同时, 阳坡多处于迎风坡, 风会加速叶片的蒸腾, 损失大量水分而使叶片萎蔫, 枝条枯死; 风的吹蚀作用还会使植物根系裸露在地表, 加速植物的死亡。由于植被对太阳辐射和长波辐射的阻挡作用使得阴坡上、下部露水凝结量差异要小些。阳坡比阴坡坡度要缓些, 这也可能是导致阳坡上、下部露水凝结量差异大的一个原因<sup>[2, 10]</sup>。

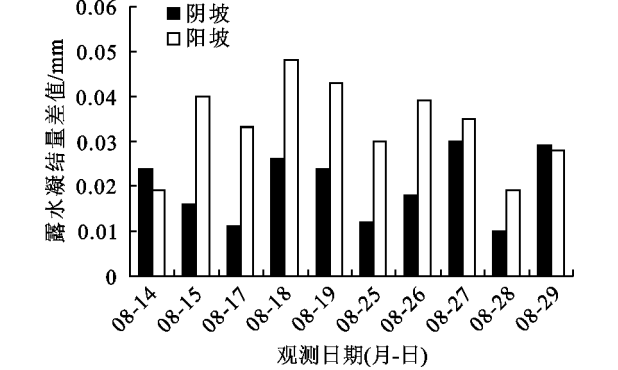


图 4 阳坡与阴坡上、下部位的露水凝结量差值

3.3 露水凝结量与实际蒸发量的比例关系

研究区年平均降水 230 mm, 年蒸发量约 2 450 mm, 降雨量小, 潜在蒸发量大, 植被的生存环境恶劣。为了定量了解露水凝结量和实际蒸发量的关系, 计算了日露水凝结量与日蒸发量的比值, 结果见图 5。

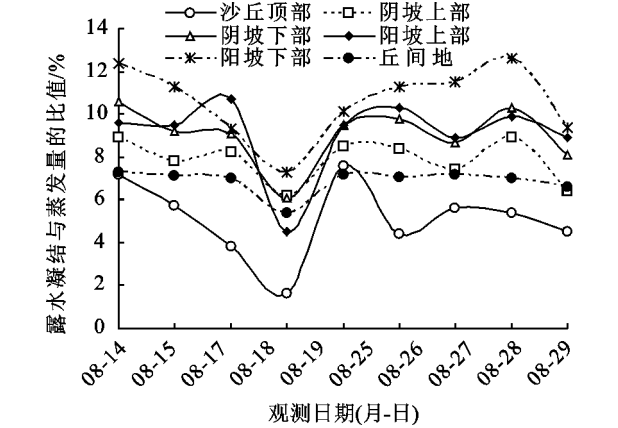


图 5 露水凝结量占实际蒸发量的百分比

由图 5 可以看出, 露水凝结量占蒸发量的比例最高可达 12.6%, 发生在阳坡的下部。从整体来看, 阳坡露水凝结量占实际蒸发量的比例最高, 其中阳坡下部要明显高于阳坡上部。其次是阴坡, 同样阴坡的下部露水凝结量所占的比例要

高于阴坡上部。丘间地露水凝结量占蒸发量的比例仅次于阴坡。丘顶露水凝结量占蒸发量的比例最小。

阳坡露水凝结量占实际蒸发量比例高的原因可能有以下几方面: 首先, 阳坡有较厚的干沙层存在。观测中发现阳坡干沙厚度达 10 cm 以上。虽然白天阳光辐射强, 气温和地表温度高, 具有很强的蒸发潜能, 但由于表层多孔隙的疏松干沙层的屏蔽作用使地表的实际蒸发却十分微弱。研究证明, 5 cm 的干沙层对蒸发的抑制作用最大可达 70.6%。随着干沙层厚度的增大, 蒸发量逐渐降低。所以, 该研究区的干沙层能有效地抑制土壤水分的蒸发。其次, 阳坡露水凝结量相对较高, 仅次于丘间地。这两方面综合作用, 使得露水凝结量占实际蒸发量比例比其他几个部位都高。阳坡下部与上部露水比例的差异, 可能是由风速的不同造成的。风速在沙丘上的分布规律是: 沙丘顶部的气速最大, 半坡次之, 沙丘底部的气速最小。随着离地面高度的增加, 风速逐渐变大。阳坡上部的植被盖度比下部相对高些, 因此实际蒸发量比下部大一些, 而露水凝结量会小些。这也可能是阳坡上、下部位存在差异的原因之一。

沙丘上的最大风速出现在沙丘顶部, 同时由于太阳辐射强烈等原因, 导致了沙丘顶部蒸发量大、凝结量小, 凝结量与实际蒸发量的比值是所有观测点中的最低值。虽然阴坡露水凝结量不高, 但由于风速、太阳辐射等因素相对于阳坡和沙丘顶部要小很多, 因此, 蒸发量也相对较小。所以, 露水凝结量和实际蒸发量的比值介于阳坡和丘间地之间。丘间地植被盖度少于阴坡而多于阳坡, 加之丘间地的地势平坦, 白天丘间地的气速要大于沙丘两侧, 所以蒸发量相对较大。同时, 太阳辐射强烈和水分条件相对较好也为强烈的蒸发创造了条件。强烈的地表蒸发可能是导致露水凝结量与实际蒸发量比值小的一个原因。实验点的丘间地土壤还未发生盐碱化, 但强烈的蒸发和相对较高的地下水位, 必然会引发土壤的盐碱化。土面盐碱膜有抑制土壤水分蒸发和增加地温变幅的作用, 将不利于土壤凝结水的发生<sup>[11]</sup>。盐碱化后的土壤水热循环将会发生变化, 这方面的问题将在进一步的研究中给予考虑。

由上面的分析可以看出, 沙丘的不同部位和丘间地的露水凝结量与蒸发量的比值存在差异。了解沙丘不同部位及丘间地露水凝结量与蒸发量比值的这种差异及造成这种差异的原因, 将有助于进一步了解沙丘及丘间地微地形、地貌的水热循环过程, 为防沙、治沙过程中植被种类的选取、配置和布局提供理论依据。

相对湿度仅表示在该温度下的空气中水汽的饱和程度。相对湿度的大小取决于两方面: 一方面是绝对湿度; 另一方面是空气温度。为了更清楚地了解气温和空气中水分含量对露水凝结的影响, 将温度和空气的含水量分开考虑, 将相对湿度转化为绝对湿度。

3.4 露水凝结量与湿度和温度的关系

由图 6、7 可以看出, 沙丘和丘间地露水凝结量的变化趋势和气温差的变化趋势基本一致, 而与空气中含水量的变化趋势关系不明显。这主要是由于观测期间降雨量比较丰富,

同时试验点距离黄河较近, 地下水位埋深较浅等因素共同作用, 使得空气中的水汽含量相对较多, 在试验期间不再是露水凝结的限制因子, 而温差成为影响露水凝结量的主控因子, 这一点在降雨后表现尤为明显。如图所示, 15 日、22 日、23 日降雨后, 由于昼夜温差大都导致随后的几天内, 露水凝结量大幅增加, 并达到了两次高峰。14 日和 18 日由于阴天, 昼夜温差小而导致第二天测量的露水凝结量大幅减少。研究结果表明, 在空气水分含量相对充足的条件下, 昼夜温差成为影响露水凝结的主控因子。在水分相对充足的情况下, 昼夜的气温差值与露水凝结量成正比。这对荒漠—绿洲过渡区的植物特别是浅根耐旱植物的生长具有重要意义。该时期正值植物生长的需水时期, 降水量虽然比其它月份多, 但由于日照时间和强度在该时期也达到最大, 因此蒸发很强烈。白天植物蒸腾作用使植物散失大量的水分。露水可使植物表面湿润, 降低叶面温度, 减少表面蒸发的水分损耗, 减少了白天初期的水分散逸, 还弥补了一部分沙地蒸发的水分损失<sup>[5]</sup>。夜晚植物的叶片虽能吸收空气中的水分, 但吸收数量有限。夜间凝结水在植物叶片的形成, 正好满足了叶片吸水的需要。因为纯净的露水水势一般来说总是大于植物叶面表皮细胞的水势, 可以形成一个有利的水势梯度, 促使植物表面对纯净水的吸收<sup>[5]</sup>。

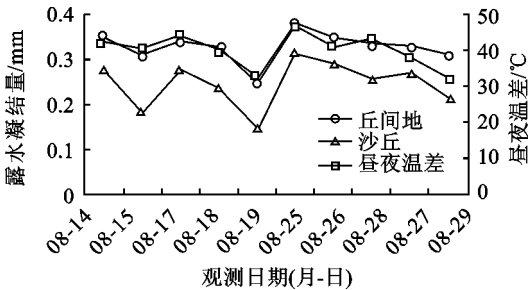


图 6 露水凝结量与昼夜温差的关系

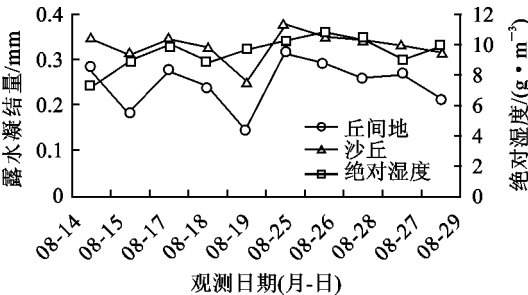


图 7 露水凝结量与绝对湿度的关系

4 结论与讨论

(1) 研究表明露水在沙丘上有明显的空间分布特征。其中丘间地露水凝结量变化范围为 0.248~0.377 mm, 阳坡为 0.160~0.362 mm, 阴坡为 0.17~0.305 mm, 沙丘顶部为 0.051~0.272 mm。沙丘各部位露水凝结量的不同说明局部微地形地貌对露水的形成具有一定的影响。实验结果还表明, 在植物生长季节, 空气的绝对湿度较大, 昼夜温差是影响露水凝结量变化的主控因子。

(2) 本次实验只是从小尺度上研究典型沙丘不同部位

(微地形地貌)对露水时空分布特征的影响,研究区域仅限于库布齐沙漠北缘与黄河河岸之间的生态过渡带。该地区的气候环境条件与库布齐沙漠内的气候环境特征仍有不同。同时露水的凝结量与距离水体远近有非常密切的关系。因此,今后的研究工作从大尺度上研究露水的时空分布特征随海拔和距水体(黄河)距离的变化规律将具有重要的意义。

(3)对库布齐沙漠北缘地区而言,其年降水量大约为 230 mm,雨季主要集中在 7—9 月,且多为短时雷阵雨。降水较多的 8 月,如按每夜 0.265 mm(本次实验结果总的平均值)的露水进入地表,则 8 月地表可得到露水 8.215 mm。就整个研究区而言,日平均降雨量约占日平均蒸发量比例为 5.14%~8.62%。尽管露水的凝结量占实际蒸发量的比例不是很大,但这种降水的有效性远高于一般降水,它作为一个持续稳定的水源,在干旱区起着非常重要的作用<sup>[10]</sup>。0.03 mm 的露水量是微生物对于水利利用的最低限度<sup>[12]</sup>,而库布齐沙漠北缘地区,平均日露水凝结量为 0.265 mm。可见,露水在沙漠生态系统中扮演着重要角色。因此深入研究露水在库布齐沙漠生态系统中的作用具有一定的理论意义和现实指导作用。

实验结果显示,该区的日平均露水凝结量为 0.172~0.324 mm。该实验结果与国内其他相似地区的现有研究成果基本一致,如:曹文炳等在甘肃省高台县测的 10~16 cm 沙土中的凝结水量为 0.06~0.36 cm<sup>[13]</sup>。但与国外报道的露水量相比,日平均露水凝结量存在一定的差异。Jacobs 等人在以色列内盖夫(Negev)沙漠对沙丘观测的丘间地的日露水凝结量为 0.1~0.3 mm<sup>[2]</sup>,而库布齐沙漠北缘地区丘间地的日露水凝结量变化范围为 0.248~0.377 mm。研究区沙丘不同部位的露水凝结量都高于 Jacobs 等人在以色列内盖夫(Negev)沙漠对沙丘的观测数值。主要原因是研究区属于生态过渡带,离黄河较近,降雨量比沙漠地区多,空气湿度相对较大。研究表明,库布齐沙漠北缘的露水凝结量相当可观,它的形成对维系荒漠化地区植被生态系统的稳定至关重要。虽然随着向沙漠腹地的深入,各种气象条件及微地形、地貌会与沙漠边缘地区有所差异,但研究区已经具备了沙漠的一些特征,本次研究的结果仍然可以参照。根据实验数据,认为在库布齐沙漠进行露水研究是完全可行的。本次实验仅为初步研究,旨在确定在库布齐沙漠进行露水研究的可行性。要把握露水在沙漠生态系统中的功能、空间分布特征及其与植物的耦合关系,还需开展进一步的研究。

参考文献:

[1] 杨俊平,邹立杰.中国荒漠化状况与防治对策研究[J].干旱区资源与环境,2000,14(3):15-23.

[2] Jacobs A F G, Heusinkveld B G, Berkowicz S M. Dew measurements along a longitudinal sand dune transect, Negev Desert, Israel[J]. International Journal of Biometeorology, 2000, 43: 184-190.

[3] Jacobs A F G, Heusinkveld B G, Berkowicz S M. Dew deposition and dry in a desert system: a simple situation model[J]. Journal of Arid Environment, 1999, 42: 211-222.

[4] 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):576-580.

[5] 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[J].干旱区资源与环境,1992,6(2):63-72.

[6] Ashbel D. On the importance of dew in palestine[J]. Palestine Oriental Soc., 1936, 16: 316-321.

[7] 郑若霏.沙地凝结水特征[J].土壤学报,1963,11(1):84-91.

[8] 梁继业.沙漠—河岸过渡带白刺沙堆个体特征及其空间分布格局[D].北京:中国林业科学研究院,2007.

[9] Sudmayer R A, Nulsen R A, Scott W D. Measured dewfall and potential condensation on grazed pasture in the Colliie river basin, southwestern Australia[J]. Journal of Hydrology, 1994, 154: 255-269.

[10] Kidron G J. Angle and aspect dependent dew and fog precipitation in the Negev desert[J]. Journal of Hydrology, 2005, 301: 66-74.

[11] 王积强.关于“土壤凝结水”问题的探讨[J].干旱区地理,1993,16(2):58-62.

[12] Kappen L, Lange O L, Schulze E D, et al. Ecophysiological investigations on lichens of the Negev desert IV: Annual course of the photosynthetic production of *Ramalina maciformis* (Del.) Bory. [J]. Flora, 1979, 168: 85-105.

[13] 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[J].水文地质工程地质,2003(2):6-10.