

# 植物叶片形成露水的室内模拟\*

高志永<sup>1</sup> 汪有科<sup>1,2\*\*</sup> 魏新光<sup>1</sup> 刘守阳<sup>1</sup> 何自立<sup>1</sup> 周玉红<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 叶片在空气中形成露水是干旱、半干旱地区植物水分来源之一, 具有重要的生态意义. 本文借助人工智能气候室和叶片温度自控系统, 对影响露水形成的环境温湿度、叶片温度和叶片倾角进行调节, 研究了叶倾角、环境温湿度、露点-叶温差对叶片露水累积速率和叶片露水量的影响. 结果表明: 叶片露水累积速率和叶片最大露水量均随叶倾角的增加而减小, 但随着环境温度、湿度和露点-叶温差的增加而增大. 叶片处于水平状态时, 叶片露水在达到最大露水量前呈线性快速递增, 露水达到最大露水量(0.80 mm)后处于稳定值; 当叶片有倾角时, 叶片露水达到一定值就会发生叶片露水滑落现象, 使得叶片露水量呈现锯齿形变化, 且露水累积速率明显变慢.

**关键词** 叶片露水累积速率 叶片露水量 叶倾角 温度 湿度 露点-叶温差

**文章编号** 1001-9332(2014)03-0725-06 **中图分类号** P426.3; Q948.1 **文献标识码** A

**Indoor simulation on dew formation on plant leaves.** GAO Zhi-yong<sup>1</sup>, WANG You-ke<sup>1,2</sup>, WEI Xin-guang<sup>1</sup>, LIU Shou-yang<sup>1</sup>, HE Zi-li<sup>1</sup>, ZHOU Yu-hong<sup>1</sup> (<sup>1</sup>College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2014, 25(3): 725-730.

**Abstract:** Dew forming on plant leaves through water condensation plays a significant ecological role in arid and semi-arid areas as an ignorable fraction of water resources. In this study, an artificial intelligent climate chamber and an automatic temperature-control system for leaves were implemented to regulate the ambient temperature, the leaf surface temperature and the leaf inclination for dew formation. The impact of leaf inclination, ambient temperature and dew point-leaf temperature depression on the rate and quantity of dew accumulation on leaf surface were analyzed. The results indicated that the accumulation rate and the maximum volume of dew on leaves decreased with increasing the leaf inclination while increased with the increment of dew point-leaf temperature depression, ambient temperature and relative humidity. Under the horizontal configuration, dew accumulated linearly on leaf surface over time until the maximum volume (0.80 mm) was reached. However, dew would fall down after reaching the maximum volume when the leaf inclination existed (45° or 90°), significantly slowing down the accumulative rate, and the zigzag pattern for the dynamic of dew accumulation appeared.

**Key words:** dew accumulation rate; leaf dew amount; leaf angle; temperature; relative humidity; dew point-leaf temperature depression.

物体表面温度低于露点温度时, 空气中的水汽在物体表面冷凝形成露水<sup>[1-2]</sup>. 虽然露水量远小于降水量, 但从其发生频率、持续时间上看, 露水是干旱半干旱地区植物的重要水源, 甚至是唯一液态水

源<sup>[3]</sup>. 自然界中许多植物的叶片都可以吸收空气中的水汽或附于其表面的露水<sup>[4]</sup>, 被叶片吸收的露水可以补充植物体内水分、延迟叶片萎蔫时间<sup>[3, 5-6]</sup>.

露水形成是一个极其复杂的过程, 与空气的动力学和热力学特性有关<sup>[7]</sup>, 因而与水汽分布、水分输送、凝结过程有关的环境因素均可影响结露过程<sup>[8]</sup>. 其中, 温度和相对湿度是控制露水形成的两个关键性因素<sup>[9-11]</sup>. 相对湿度直接反映了空气中水

\* 国家科技支撑计划项目(2011BAD29B04, 2013BAD20B03)和陕西省科技统筹创新工程计划项目(2013KTZB02-03-02)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: gizwyk@vip.sina.com  
2013-07-22 收稿, 2013-12-17 接受.

汽接近饱和的程度,是结露的内因,为其提供水汽来源;温度是结露的关键因素,为其提供“源动力”<sup>[12]</sup>。叶片表面温度低于露点温度是植物叶片露水形成的必要条件,只有当露点温度与叶温存在大于 0 °C 的差值时,叶片表面才会有露水形成。在野外,露点与叶温会随着环境温湿度的变化而变化,因而当露点温度与叶温之差在某时段内小于 0 °C 时,露水的形成会发生间断,进而影响露水量。Kidron<sup>[13]</sup>和 Sentelhas 等<sup>[14]</sup>研究表明,在自然环境中,不同叶倾角条件下的露水量和持续时间存在差异。前人对不同倾角条件下的露水量进行了研究,但由于测量装置的局限性,仅研究了倾角对露水量或露水持续时间的影响,对于不同倾角露水形成过程的定量研究尚无报道。

目前,露水的观测方法仍在不断探索,测量仪器有杨木棒 (poplar woodstick)<sup>[15-16]</sup>、吸墨纸 (blotting paper)<sup>[17-18]</sup>、Hiltner 露量式天平 (Hiltner dew balance)<sup>[19]</sup>、平板式感应器 (flat plate sensor)<sup>[20-21]</sup>、叶片湿度传感器 (leaf wetness duration sensors)<sup>[22]</sup>、布片法 (cloth plate method)<sup>[23-25]</sup> 等。由于测量仪器的表面不是自然凝结表面,测量的露水量与实际值存在差异<sup>[26-29]</sup>。不同测量方法得出的露水量大小不一<sup>[30]</sup>。本研究采用 DECAGON 公司生产的高分辨率且无需校准的电介质式叶片湿度传感器 (dielectric leaf wetness sensor),能够更加真实地反映植物叶片的结露状况。因为它非常接近于真实叶片的辐射特性,同时叶片表面涂层具有疏水性,与真实叶子疏水性角质层相似。此外,自然界中的植物叶片存在不同程度的倾斜,不同倾角的露水形成过程难以测量;随着环境温湿度的变化,露点和叶温也会影响露水形成过程,进而影响到露水量。针对以上复杂性,本研究借助于人工智能气候室和叶片温度调节系统,通过调节叶倾角、环境温湿度、露点-叶温差来研究植物叶片露水累积速率和叶片露水量与影响因素的关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2013 年 3 月在位于陕西杨凌 (34°16' N, 108°4' E) 的中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工智能型气候室内进行。该室的智能系统由杭州求是人工环境有限公司浙江大学电气设备厂研发,室面积为 10 m<sup>2</sup>,温度控制范围在 -10 ~ 40 °C (精度 ±1 °C),湿度控制范围在

30% ~ 95% (精度 ±3%)。室内温湿度由该室智能系统自动控制。

本试验采用电介质式叶片湿度传感器 (dielectric leaf wetness sensor, DECAGON) 监测结露状况。该传感器监测的是其上表面以上 1 cm 范围内的介电常数变化,传感器读数以电压 (mV) 信号输出,该电压值与介电常数呈比例,经过转换即可得露水量。数据由 Em50 每隔 1 min 自动记录一次,记录时长为 1 h。

本试验中叶片表面温度由温度调节控制系统 (图 1) 来改变和维持。该系统由 AI-518P 型人工智能温度控制器 (厦门宇电自动化科技有限公司)、水泵 (万豪科技)、风扇 (星河电子)、中央处理器 (星河电子)、制冷装置 (字光仪器)、温度探头 (高鑫电子, 0.1 °C)、输水管等组成。该系统位于 0.8 m × 0.8 m × 2.5 m (长 × 宽 × 高) 的铁合金平台上,在运行时,温度探头将感测到叶片表面的实际温度以电信号的形式反馈给人工智能温度控制器,中央处理器根据人工智能温度控制器测定的叶片实际温度和设定温度来调节和控制叶片表面温度,最终使叶片温度达到设定温度。

### 1.2 试验方法

根据黄土丘陵半干旱区陕北米脂县 2000—2010 年的温度资料,该地易于结露的季节里,温度大多处于 15 ~ 25 °C。此外,张强等<sup>[26]</sup>研究表明,当相对湿度不小于 80% 时,露水能够发生。结合人工气候室条件,本试验设定如下 4 组温湿度组合: C<sub>1</sub> (95%, 15 °C)、C<sub>2</sub> (95%, 25 °C)、C<sub>3</sub> (80%, 15 °C)、C<sub>4</sub> (80%, 25 °C)。

测量步骤: 1) 选定一组温湿度组合,如 C<sub>1</sub>,调节气候室的温湿度控制按钮,设置室内温湿度分别为 15 °C、95%; 2) 根据已选定的温湿度,采用 Sensor 公司推荐的 Magnus-Teten 公式计算理论露点温度;

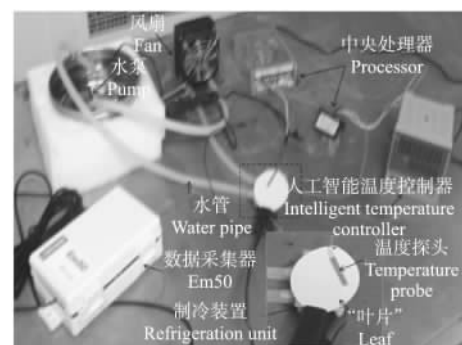


图 1 叶片温度调节控制系统

Fig. 1 Leaf temperature control system.

3) 将叶片水平置于制冷装置表面,并在叶片上放置温度探头,打开人工智能温度控制器,设定叶片温度为理论露点温度,观测叶片表面的结露状况.根据叶片表面结露与否来调节人工智能温度控制器,直至叶片表面恰好结露为止,此时所调温度为叶片实际露点温度( $T_d$ );4) 调节人工智能温度控制器,使叶片表面温度 $T_1$ 分别为 $T_d$ 、 $T_d-2$ 、 $T_d-5$ 和 $T_d-8$ ( $^{\circ}\text{C}$ ),并在4种温度条件下各监测1 h;5) 使制冷装置与水平面分别成 $45^{\circ}$ 和 $90^{\circ}$ 夹角,在各夹角状态下重复步骤3、4.对其余的温湿度组合重复步骤1~5,直至测完.

### 1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行处理,利用 Origin 8.5 软件绘图.

## 2 结果与分析

### 2.1 叶倾角对叶片露水形成过程的影响

本研究中,不同温湿度及露点-叶温差条件下的叶片露水量和累积量随时间变化趋势基本一致,因此下文仅选择具有代表性条件下的叶片露水量和累积量曲线加以研究,二者在其他条件下的变化规律不再赘述.

选择相对湿度 95%、环境温度  $25^{\circ}\text{C}$ 、露点-叶温差  $8^{\circ}\text{C}$  的条件下,以  $0^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$  叶倾角为研究对象.由叶片不同倾角露水量随时间的变化可以看出,叶片倾角为  $0^{\circ}$  时,露水量随时间的变化呈线性增加;当倾角为  $45^{\circ}$  和  $90^{\circ}$  时,其露水量达到一定值就出现锯齿形波动.在  $45^{\circ}$  和  $90^{\circ}$  叶倾角露水量初次滚落后,不同叶倾角露水量大小次序为:  $0^{\circ} > 45^{\circ} > 90^{\circ}$  (图 2).由图 2 还可以看出,水平放置叶片,叶片露水量在 46 min 时达到最大记录量,其值为  $0.80\text{ mm}$ ,其累积速率为  $1.044\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ;  $45^{\circ}$  叶倾角在 33 min 时出现最大露水量 ( $0.33\text{ mm}$ ),在  $45^{\circ}$  叶倾角的露水量达到最大量之前,叶片露水累积速率为  $0.693\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,在最大量之后,叶片露水累积速率为  $0.180\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ;当叶片倾角为  $90^{\circ}$  时,叶片最大露水量出现在 33 min,其值为  $0.30\text{ mm}$ ,在其露水量达到最大量之前,叶片露水累积速率为  $0.582\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,在最大量之后,叶片露水累积速率为  $0.168\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ .可见,随着叶倾角的增大,叶片最大露水量和累积速率均减小;叶片累积总量表现为倾角越小其值越大,这个现象可能与露水在叶片上的滚落有关.

### 2.2 温度和湿度对叶片露水形成过程的影响

由  $45^{\circ}$  叶倾角在  $5^{\circ}\text{C}$  露点-叶温差和不同温湿度 (RH 80%、95%,  $T_a$  15、 $25^{\circ}\text{C}$ ) 条件下的露水量和露水

累积量随时间变化曲线可以看出,叶片露水量在未达到叶片最大露水量前呈现出线性增加趋势;达到最大量之后,叶片露水量围绕一个定值上下波动(图 3).在低温、低湿条件下 (RH 80%、 $T_a$   $15^{\circ}\text{C}$ ),叶片最大露水量 ( $0.24\text{ mm}$ ) 出现在 51 min;在高温高湿条件 (RH 95%、 $T_a$   $25^{\circ}\text{C}$ ) 下,叶片最大露水量

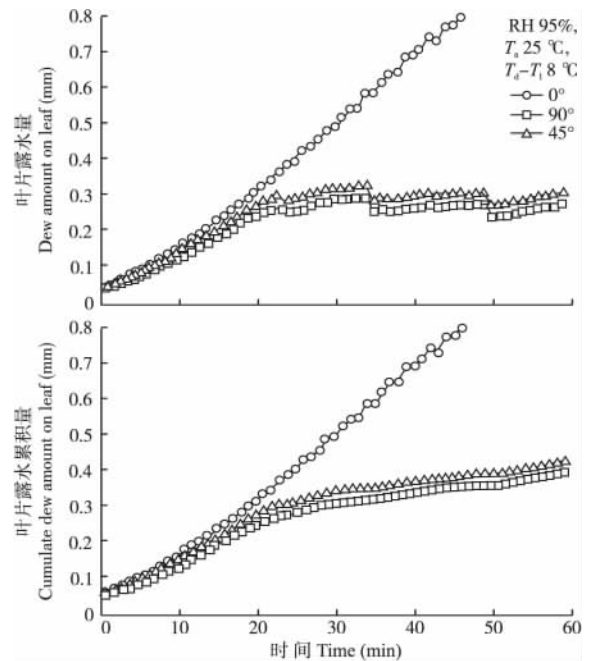


图 2 不同叶倾角对叶片露水形成过程的影响

Fig. 2 Influence of different leaf angles on dew formation.

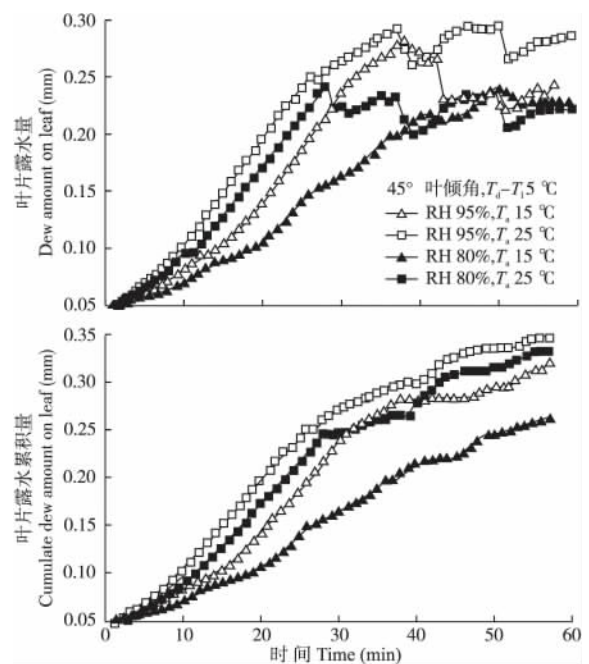


图 3 不同温度和湿度对叶片露水形成过程的影响

Fig. 3 Influence of different temperature and relative humidity on dew formation.

(0.30 mm) 出现在 46 min. 说明叶片最大露水量随着温湿度的增加而增大. 在相同的温度(湿度)条件下,随着湿度(温度)的增加,叶片露水累积速率呈增加趋势. 温度为 15 °C、相对湿度为 80% 和 95% 时,在叶片露水量达到最大值前、后,叶片露水累积速率分别为 0.126、0.108 和 0.690、0.258 mm · h<sup>-1</sup>; 温度为 25 °C、相对湿度为 80% 和 95% 时,在叶片露水量达到最大值前、后,露水累积速率分别为 0.168、0.144 和 0.468、0.438 mm · h<sup>-1</sup>. 说明在一定范围内,温度和湿度的增加对叶片露水量的累积均存在促进作用.

### 2.3 露点-叶温差对叶片露水形成过程的影响

露点温度表示空气在水汽含量和气压不改变的条件下,冷却到饱和时的温度<sup>[27]</sup>. 而露点-叶温差直接反映了叶片表面空气距离饱和的程度. 45° 叶倾角在相同温湿度(RH 95%、 $T_a$  25 °C) 条件下,在露点-叶温差较低时(0 和 2 °C) 没有观测到叶片最大露水量. 这可能是在较短的观测时间内,较小的结露速率所致;而较大的露点-叶温差(5 和 8 °C) 使得叶片分别在 36 和 33 min 出现最大露水量,最大露水量分别为 0.29 和 0.33 mm(图 4). 可见,随着露点-叶温差的增加,叶片最大露水量显著增大. 当露点-叶温差为 0 °C 时,叶片处于结露和不结露的临界状态,叶片露水累积速率仅为 0.006 mm · h<sup>-1</sup>; 当露点-叶温

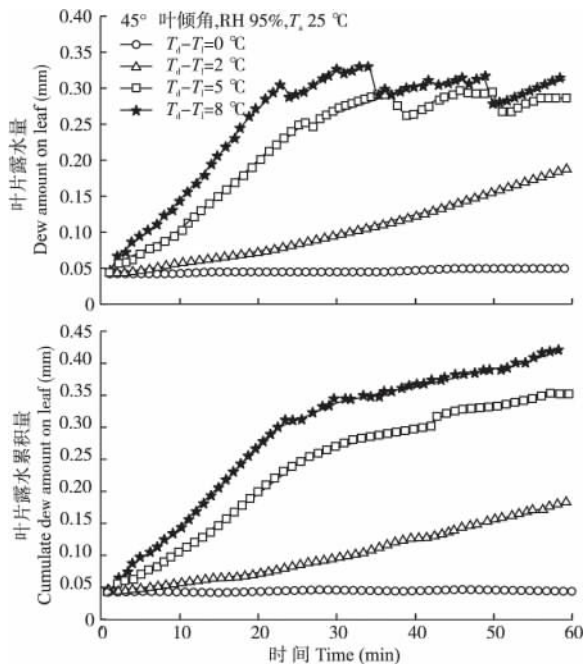


图 4 不同露点-叶温差对叶片露水形成过程的影响  
Fig. 4 Influence of different dew point-leaf temperature depression on dew formation.

差为 2 °C 时,累积速率变为 0.150 mm · h<sup>-1</sup>; 当露点-叶温差增加到 5 和 8 °C 时,叶片露水量出现最大量,在最大量前、后的结露速率分别为 0.510、0.150 和 0.678、0.162 mm · h<sup>-1</sup>. 可见,叶片露水累积速率随着露点-叶温差的增加而增大.

### 3 讨 论

本研究中,最大露水量随叶倾角增加而减小,这与 Kidron<sup>[13]</sup> 和 Muselli 等<sup>[31]</sup> 的研究结果相同. Kidron<sup>[13]</sup> 和 Muselli 等<sup>[31]</sup> 认为,露水量随倾角增加而减小的主要原因是有效辐射面积随着倾角的增加而减小,改变了开阔度 (sky view factor, SVF), 影响了物体表面温度. 在本研究中,虽然叶倾角发生变化,但温控装置的存在,使得叶片表面维持了恒定的温度. 由此认为,导致最大露水量随叶倾角增加而减小的原因并不是有效辐射面积的变化,而是不同叶倾角表面液滴所受重力分力不同所致. 在液滴增长过程中,小液滴通过合并形成较大液滴,当液滴尺寸大于 2.5 mm 时,重力对液滴产生作用<sup>[32]</sup>. 不同叶倾角面上的液滴因重力沿倾角表面的分力大于表面张力而滚落. 对于 45° 倾角面上液滴而言,大于表面张力的力仅是重力的一个分力,欲使液滴滚落,则必须有较大的露水量. 而 90° 倾角液滴受到重力影响最大,较小的露水量就可以滚落. 液滴在脱离叶片表面的过程中,会带走它所接触的其他液滴,叶片表面因液滴脱离而留下轨迹,水汽在此轨迹上又重新形成新液滴<sup>[33]</sup>. 新液滴增长存在两个过程:水汽在液滴上直接冷凝和相邻液滴之间合并<sup>[32]</sup>,当液滴经历这两个过程并增长到一定尺寸后,会在重力作用下又开始滚落,如此循环往复,使叶片露水量达到一定值后出现锯齿形波动. 目前所采用方法测定的是叶片上存在的露水量. 其实在叶片有倾角情况下,随着倾角的加大,露水在形成过程中随时都存在流失,可能没有测得全部流失的露水. 也就是说,实际由叶片形成的露水估计大于目前实测值. 自然界中叶片有倾角的现象较为普遍. 由于倾角的存在,使得叶片上的露水更易滚落. 叶片在形成露水时不但为植物体提供了水分,而且滚落的露水会为叶片以下的植物等提供一定水分. 而滴落到土壤表面的露水也会被表层土壤吸收<sup>[16]</sup>,补充了土壤失去的部分水分,一定程度上缓解了土壤水分的紧张状况<sup>[3]</sup>.

叶片最大露水量随湿度增加而增大,这与 Zangvil<sup>[19]</sup>、Li<sup>[10]</sup> 和 Xu 等<sup>[11]</sup> 的研究结果一致. 较高的湿度为结露提供了较多的水汽,缩短了初次核化和液

滴增长所需的时间,促进了露水在不同叶倾角上的形成.湿度与温度存在一定的联系.Ye等<sup>[7]</sup>认为,较高的环境温度可以使地表保持较高的温度,高于露点温度而难形成露.较高的温度可加强蒸发、减少地表相对湿度.本研究中叶片处于密封的气候室内,温度和湿度均设定为恒定值,较高的温度并没有减少或阻止露水的生成,反而加速了叶片累积速率和最大露水量.

在自然环境中,物体表面温度会随着外界环境温度的升高而升高,较高的环境温度使得物体表面温度高于露点温度而难以结露.本试验利用叶片温度调节控制系统控制了叶片表面温度,叶片表面温度不会因环境温度的增大而增大.此外,饱和水汽压是环境温度的单值函数<sup>[34]</sup>,饱和水汽压与环境温度变化同步调.随着气候室温度的升高(如RH 95%, $T_a$  15~25℃),饱和水汽压升高.相对湿度是水汽压与饱和水汽压的比值.人工气候室为了保持恒定的相对湿度,水汽压随之变大,加速了汽态分子的运动速度,使汽态分子“撞击”叶片的机会增加,导致累积速率变大.当运动的汽态分子遇到较冷叶片时,汽态分子因失去热量而降温,又引起饱和水汽压降低.饱和水汽压的降低意味着空气分子容纳水汽的能力减小,于是过剩的水汽会在较冷的叶片表面凝结.

#### 参考文献

- [1] Agam N, Berliner P. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments: A review. *Journal of Arid Environments*, 2006, **65**: 572–590
- [2] Malek E, McCurdy G, Giles B. Dew contribution to the annual water balances in semi-arid desert valleys. *Journal of Arid Environments*, 1999, **42**: 71–80
- [3] Ye Y-H (叶有华), Peng S-L (彭少麟). Review of dew action effect on plants. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(11): 3190–3196 (in Chinese)
- [4] Zhang Y-L (庄艳丽), Zhao W-Z (赵文智). Experimental study of effects of artificial dew on *Bassia dasyphylla* and *Agriophyllum dasyphylla*. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2010, **30**(5): 1068–1074 (in Chinese)
- [5] Zhang Y-L (庄艳丽), Zhao W-Z (赵文智). Study on the ecological effects of condensed water on an annual plant in a temperature desert. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2009, **26**(4): 526–532 (in Chinese)
- [6] Hao XM, Li C, Guo B, et al. Dew formation and its long-term trend in a desert riparian forest ecosystem on the eastern edge of the Taklimakan Desert in China. *Journal of Hydrology*, 2012, **472–473**: 90–98
- [7] Ye YH, Zhou K, Song LY, et al. Dew amounts and its correlations with meteorological factors in urban landscapes of Guangzhou, China. *Atmospheric Research*, 2007, **86**: 21–29
- [8] Zhang Q (张强), Wang S (王胜). Processes of water transfer over land surface in arid and semi-arid region of China. *Journal of Arid Meteorology* (干旱气象), 2007, **25**(2): 1–4 (in Chinese)
- [9] Beysens D. The formation of dew. *Atmospheric Research*, 1995, **39**: 215–237
- [10] Li XY. Effects of gravel and sand mulches on dew deposition in the semiarid region of China. *Journal of Hydrology*, 2002, **260**: 151–160
- [11] Xu YY, Yan BX, Luan ZQ, et al. Dewfall variation by large-scale reclamation in Sanjiang Plain. *Wetlands*, 2012, **32**: 783–790
- [12] Wang S (王胜), Zhang Q (张强). Atmospheric physical characteristics of dew formation in semi-arid in Loess Plateau. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2011, **60**(5): 846–853 (in Chinese)
- [13] Kidron GJ. Angle and aspect dependent dew and fog precipitation in the Negev desert. *Journal of Hydrology*, 2005, **301**: 66–74
- [14] Sentelhas PC, Gillespie TJ, Gleason ML, et al. Operational exposure of leaf wetness sensors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **126**: 59–72
- [15] Xu Y-Y (徐莹莹), Yan B-X (阎百兴), Wang L-X (王莉霞). A research of dewfall in paddy. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2011, **44**(3): 524–530 (in Chinese)
- [16] Yan B-X (阎百兴), Deng W (邓伟). Study on the dew resource in Sanjiang Plain. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2004, **19**(6): 732–737 (in Chinese)
- [17] Jacobs AFG, Nieveen JP. Formation of dew and the drying process within crop canopies. *Meteorological Applications*, 1995, **2**: 249–256
- [18] Luo WH, Goudriaan J. Dew formation on rice under varying durations of nocturnal radiative loss. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, **104**: 303–313
- [19] Zangvil A. Six years of dew observations in the Negev Desert, Israel. *Journal of Arid Environments*, 1996, **32**: 361–371
- [20] Madeira AC, Kim KS, Taylor SE, et al. A simple cloud-based energy balance model to estimate dew. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, **111**: 55–63
- [21] Sentelhas PC, Marta AD, Orlandini S, et al. Suitability of relative humidity as an estimator of leaf wetness duration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, **148**: 392–400
- [22] Kabela ED, Hornbuckle BK, Cosh MH, et al. Dew frequency, duration, amount, and distribution in corn and soybean during SMEX05. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, **149**: 11–24
- [23] Kidron GJ. Analysis of dew precipitation in three habitats within a small arid drainage basin, Negev Highlands, Israel. *Atmospheric Research*, 2000, **55**: 257–270
- [24] Kidron GJ, Herrnstadt 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
- [25] Kidron GJ. Altitude dependent dew and fog in the Negev Desert, Israel. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, **96**: 1–8
- [26] Zhang Q (张强), Wang S (王胜), Wen X-M (问晓梅), et al. An experimental study of land surface condense phenomenon and water budget characteristics over the Loess Plateau. *Acta Meteorologica Sinica* (气象学报), 2012, **70**(1): 28–35 (in Chinese)
- [27] Zhang Z-F (张志富), Xi S (希爽). Study on calculation of dew-point temperature. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2011, **28**(2): 275–281 (in Chinese)
- [28] Richards K. Observation and simulation of dew in rural and urban environments. *Progress in Physical Geography*, 2004, **28**: 76–94
- [29] Zhang Q (张强), Wen X-M (问晓梅), Wang S (王胜), et al. On measuring methods and exploitation technology for dewfall on land surface. *Plateau Meteorology* (高原气象), 2010, **29**(4): 1085–1092 (in Chinese)
- [30] Muselli M, Beysens D, Milimouk I. A comparative study of two large radiative dew water condensers. *Journal of Arid Environments*, 2006, **64**: 54–76
- [31] Muselli M, Beysens D, Marcillat J, et al. Dew water collector for potable water in Ajaccio (Corsica Island, France). *Atmospheric Research*, 2002, **64**: 297–312
- [32] Beysens D. Dew nucleation and growth. *Comptes Rendus Physique*, 2006, **7**: 1082–1100
- [33] Mei M-F (梅茂飞). Fractal Analysis of Growth and Heat Transfer of Droplets in Dropwise Condensation. PhD Thesis. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011 (in Chinese)
- [34] Shen C-K (沈春康). Atmospheric Thermodynamics. Beijing: China Meteorological Press, 1983 (in Chinese)

---

作者简介 高志永 男, 1986 年生, 硕士研究生. 主要从事节水灌溉新技术研究. E-mail: gaozhiyongstudent@gmail.com  
责任编辑 杨 弘

---