

陕北黄土丘陵区露水量及影响因子

王 浩^{1,2} 贾志峰^{1,2,3} 王 智^{1,2,3,4,5*}

(¹长安大学环境科学与工程学院, 西安 710054; ²长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054; ³长安大学水与发展研究院, 西安 710054; ⁴西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; ⁵美国加利福尼亚州州立大学弗雷斯诺分校地球与环境科学系, 美国加州弗雷斯诺 93740)

摘 要 为探明中国黄土丘陵半干旱区露水量特征及其影响因子, 利用叶片湿度传感器(LWS)在陕西安塞县进行1年的监测试验. 结果表明: 安塞地区2015—2016水文年露水总量为29.85 mm, 日最大露水量可达0.82 mm. 露水凝结量主要呈现日变化和季节变化两种特征, 日变化过程中露水凝结量大多发生在18:00至次日7:00; 季节变化中露水在秋季凝结量最大, 夏季次之, 春、冬季最少. 在时空分布上, 露水和降雨高度互补, 露水大多产生于晴朗无云夜间, 但降雨前后几天更有利于露水凝结. 空气相对湿度和气温-露点差是影响露水凝结的主要因素, 露水量与相对湿度呈显著正相关($r=0.726, P<0.01$), 与气温-露点差呈显著负相关($r=-0.725, P<0.01$); 风速、风向在一定程度上影响露水凝结, 但风速($r=0.133, P<0.01$)、风向($r=0.219, P<0.01$)与露水量之间的相关性较弱.

关键词 露水量; 降雨; 气象因子; 黄土丘陵区

Dew amount and its inducing factors in the loess hilly region of northern Shaanxi Province, China. WANG Hao^{1,2}, JIA Zhi-feng^{1,2,3}, WANG Zhi^{1,2,3,4,5*} (¹College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; ²Ministry of Education Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Chang'an University, Xi'an 710054, China; ³Research Institute of Water and Development, Chang'an University, Xi'an 710054, China; ⁴College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ⁵Department of Earth and Environmental Sciences, California State University, Fresno, California 93740, USA).

Abstract: In order to determine the characteristics of dew amount and its inducing factors in the semi-arid area of loess hilly region of China, a year-long *in-situ* monitoring experiment was carried out in Ansai County of Shaanxi Province, using a leaf wetness sensor (LWS). Results showed that the annual cumulative dew amount in Ansai area in the water year of 2015–2016 was 29.85 mm with a daily maximum of 0.82 mm. The amount of dew condensation manifested two strong characteristics: the daily and seasonal changes. The majority of daily dew amount appeared from 18:00 o'clock to 7:00 o'clock, and the seasonal dew changes showed that the maximum yield of dew occurred in the autumn, followed by the summer, with the least amount in spring and winter. With respect to spatial and temporal distribution, rain and dew were highly complementary as dew occurred mainly in the cloudless nights, but it was more conducive to dew condensation during the days right before and after the rain events. Relative air humidity and the difference between air temperature and dew point were the main factors influencing dew condensation. Dew amount was significantly positively correlated to relative humidity ($r=0.726, P<0.01$), and negatively correlated to air temperature-dew point difference ($r=-0.725, P<0.01$). Wind speed and direction affected dew condensation to some extent, but dew amount was weakly correlated to wind speed ($r=0.133, P<0.01$) and wind direction ($r=0.219, P<0.01$).

Key words: dew amount; rainfall; meteorological factors; loess hilly region.

本文由“111”引智计划项目(B08039)、中央高校基本科研业务费专项(310829161003)和西北农林科技大学后稷学者专项(Z111021003)资助. This work was supported by the “111” Project (B08039), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (310829161003) and the Houji Scholar Special Funds of Northwest A&F University (Z111021003).

2017-04-28 Received, 2017-08-12 Accepted.

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: zwang@csufresno.edu

露水是在物体表面温度低于露点温度时,由空气中水汽在基体表面凝结而成^[1-2].在干旱半干旱地区,露水作为一项重要的非降水性水分补给^[3-4],不仅可以被植物和小型动物直接吸收利用,而且吸收利用效率远高于降水^[4].在有些地区,露水甚至成为影响动植物生长的决定因素^[5].近年来,国内外众多学者已在旱区开展露水资源的开发利用研究.比如, Li^[6]在西北地区沙田和裸地上进行了露水收集试验; Lekouch 等^[7]在摩洛哥进行露水利用试验,该水源在微处理后可直接供住户日常使用; Sharan 等^[8]在印度 Kutch 地区进行了大型露水收集试验,仅 2007 年收集露(雨)水量就达 6545 L.迄今,众多学者在关于露水的形成机理以及生态功能方面做了许多初步研究,但对露水开发利用技术的研究还十分缺乏^[9-10].

露水的形成是多种因素综合作用的结果,探明露水量特征及其影响因素是露水资源开发利用的前提.由于露水在单位时间内的自然凝结量较少,为进行准确测量,国内外学者探讨使用了许多不同的测量方法,比如 Hiltner 天平法^[11]、杨木棒法^[12]、吸墨纸法^[13]、称重式蒸散仪法^[14]、平板式感应器法^[1]、电子传感器法^[15]等,但目前仍没有形成统一的露水观测标准.在现有研究成果中,关于黄土丘陵半干旱区露水量特征及其影响因素的研究相对较少.因此,本文采用叶片湿度传感器(LWS, Decagon 公司, USA)进行露水量观测,并探讨了黄土丘陵半干旱区露水量与不同影响因素之间的关系,以期为正确分析半干旱地区露水量提供依据,并为日后露水资源的开发利用提供参考.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本试验在中国科学院水利部水土保持研究所安塞水土保持综合试验站气象园内开展.安塞站(36°51'30" N, 109°19'23" E)位于黄土高原中部,陕西省延安市安塞县境内,属典型黄土丘陵沟壑区.该地海拔 1068~1309 m,年均气温 8.8 ℃,年平均降雨量 500 mm;气候处于暖温带半湿润向半干旱过渡区,是受人类活动影响的典型水土流失严重区.

1.2 仪器标定

本试验中露水监测仪器采用 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(leaf wetness sensor, LWS),该传感器表面具有与真实叶片相近的辐射特性和热力学性质,且表面涂层

具有疏水性,与真实叶片疏水性角质层相似.仪器主要监测其上表面约 1 cm 高度范围内的介电常数,该介电常数大小主要依赖传感器表面的湿气或霜冻.传感器输出的原始值为电压,电压与介电常数呈正比.

为方便露水量数据转换,本文对仪器进行试验率定:在室内选定一小型“喷雾器”,能够控制每次喷出水量,将水以雾状形式喷在传感器表面,通过数据采集器记录传感器的原始电压值,并测得累积喷水量,得到率定曲线(图 1).率定得到传感器原始值(电压)与露水量的转换关系见公式(1), $R^2=0.995$,拟合度较高,能够准确反映实测露水量.

$$W_{di} = 4 \times 10^{-14} x_i^{4.4188}$$

(1)

式中: W_{di} 为 i 时段的实测露水值(mm); x_i 为露水传感器测量的 i 时段内的原始电压值(最低临界值为 447 mV).

1.3 试验安装

在气象园内选取裸地,露水测量仪安置在裸地地表上方 20 cm 处,并在裸地不同高度分别架设风速仪(200 cm)、大气湿度仪(20 cm)、雨量计(160 cm)等气象观测设备,具体仪器详情见表 1,田间试验安装见图 2.所有测量数据均由 EM50(Decagon)数据采集器自动采集记录,采集间隔为 15 min.数据采集时间为 2015 年 7 月 15 日至 2016 年 7 月 10 日.

1.4 研究方法

目前,关于日露水量的定义还没有形成统一标准.本文定义日露水量为 1 d(24 h)内在单位面积上所有露水凝结过程中露水增量之和,计量单位为体积除以面积即水深(mm),与降雨量测算单位相同.为了便于研究露水周期,以最不可能发生露水的 16:00 为始末时间,定义为露水日(16:00—次日

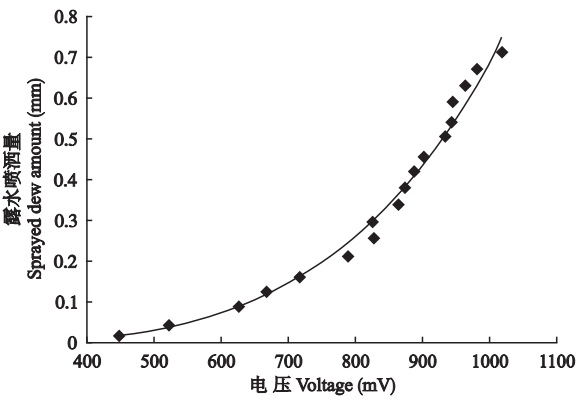


图 1 露水仪率定曲线
Fig.1 Dew sensor calibration curve.

表 1 测量仪器参数
Table 1 Sensor parameters

仪器 Sensor	型号 Model	公司 Company	精度 Precision
露水测量仪 Dew sensor	LWS	Decagon, USA	±0.02 mm
大气湿度仪 Relative humidity sensor	VP-3	Decagon, USA	最小相对湿度 Minimum relative humidity: ±2%; 温度 Temperature: ± 0.1 ℃
风速仪 Wind speed sensor	Davis Cup	Decagon, USA	风速 Wind speed: ± 0.45 m · s ⁻¹ ; 风向 Wind direction: ± 1 °
雨量计 Rain gauge	ECRN-100	Decagon, USA	±0.2 mm

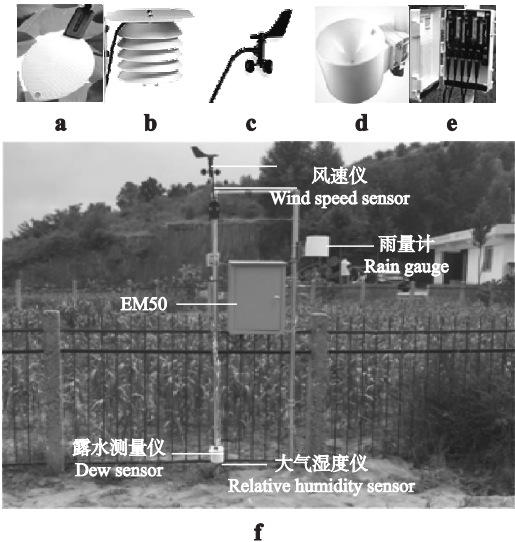


图 2 安塞试验站气象园露水监测设备及安装图
Fig.2 Dew monitoring system and installation in Ansai Meteorological Station.

a) 露水测量仪 Dew sensor; b) 大气湿度仪 Relative humidity sensor; c) 风速仪 Wind speed sensor; d) 雨量计 Rain gauge; e) EM50 数据采集器 EM50 data logger; f) 田间设备安装 Field equipment installation.

16:00). 由于降雨和结露难以界定, 研究中降雨时段视为无露水发生. 露水日凝结过程中的日露水量即为所有露水凝结时段内实测露水值增量和, 实测值下降阶段(露水凝结量小于蒸发量)或水平阶段(露水凝结量等于蒸发量)不计入日露水量计算, 视为

蒸发过程. 此法计算的露水量由于未计入蒸发量而偏小, 但因时段内蒸发量很小, 故所得的结果可视为有效露水量. 此外, 由于未进行露点测定, 文中露点数据由 Lawrence 公式^[16]推算而来.

1.5 数据处理

利用 SPSS 22.0 软件对露水量和影响因子进行相关分析. 采用 Microsoft Excel 软件绘图.

2 结果与分析

2.1 露水量

2.1.1 典型日露水量 由典型露水日(2015 年 7 月 18 日, 图 3)凝结过程可以看出, 从 16:00 起, 随着气温逐渐下降并接近露点温度, 相对湿度增加以及风速下降, 露水在 23:00 开始凝结, 凝结量随时间递增, 直至次日 7:00 凝结量达到最大值(0.43 mm), 此后露水量不再增加反而递减, 至 9:00 因蒸发而消失. 由此可见, 露水主要在晚间凝结, 露水量一般在次日早晨达到最大值, 白天因气温上升(远高于露点)、蒸发强度加大, 露水难以凝结.

2.1.2 季节日均露水量 由图 4 可以看出, 不同季节日均露水量变化趋势整体相似. 春季露水量日变化幅度较小, 露水大约在 22:00 开始凝结, 此后凝结量逐渐增大, 直至次日 6:00 达到最大量(0.07mm),

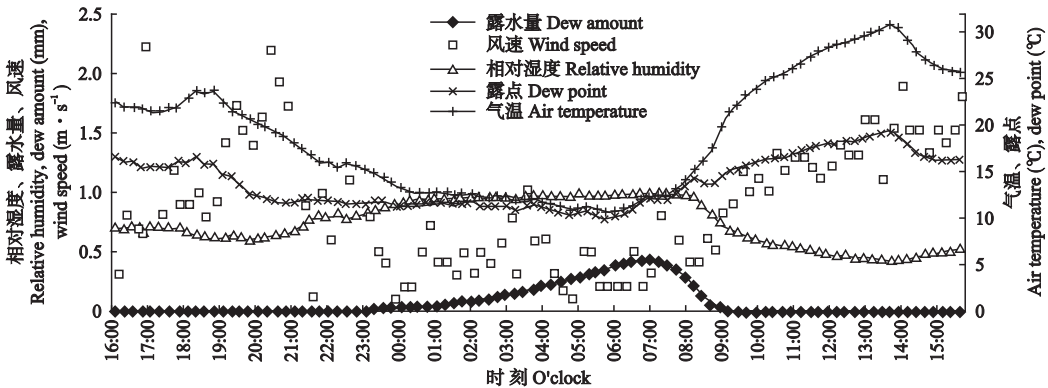


图 3 典型露水日凝结过程
Fig.3 Condensation process in a typical dew day.
相对湿度变化为 0~1 区间, 表示 0~100% 区间 Relative humidity varied between 0 and 1, representing 0~100%.

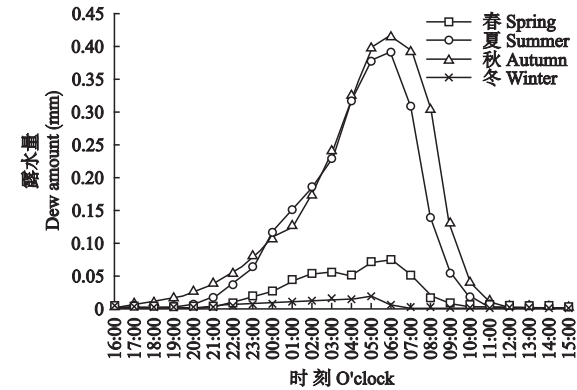


图 4 不同季节日均露水量的变化
Fig.4 Changes of average daily dew amount in different seasons.

10:00—20:00 之间几乎没有露水凝结.夏季露水量日变化幅度较大,且夏季各时段露水值均比春季要高,尤其在 6:00 平均露水量可达 0.39 mm.秋季平均日露水量变化趋势与夏季相似,除 0:00—2:00 时段外,秋季露水量均略高于夏季,露水量也在 6:00 达到最大值(0.41 mm).冬季受低温影响,露水凝结较少,各时段露水量也为四季中最小,日平均露水量在 5:00 达到最大值(0.02 mm).全年来看,露水一般在 18:00 开始凝结,随时间变化凝结量有递增趋势,5:00—7:00 露水量达到最大,此后凝结量骤减,10:00—18:00 几乎没有露水凝结.

2.1.3 季节露水总量 从露水总量的季节分布可以看出,露水量随季节变化明显(图 5).露水量在夏秋季居多,春夏季居少.各季节露水量大小关系如下:秋季(14.42 mm)>夏季(11.30 mm)>春季(3.57 mm)>冬季(0.51 mm).夏秋两季露水量较高的观测结果与叶有华等^[17]在亚热带,阎百兴等^[18]在温带的研究结果一致.

2.1.4 年内露水量 由图 6 可以看出,监测期间

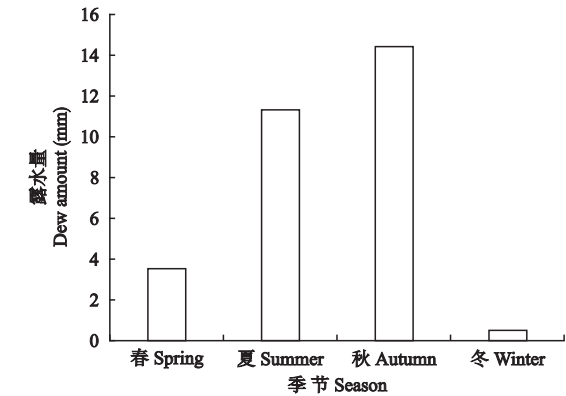


图 5 露水量季节分布
Fig.5 Seasonal distribution of dew amount.

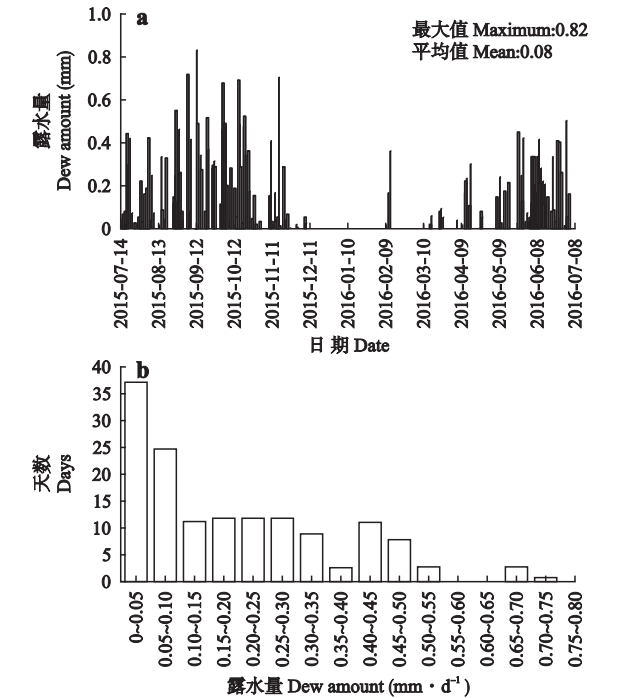


图 6 年内露水量分布
Fig.6 Annual distribution of dew amount.

a) 露水量年内变化 Annual variation of dew amount; b) 露水量分布 Distribution of dew amount.

(2015 年 7 月 15 日—2016 年 7 月 10 日),露日数为 148 d,年内露水总量 29.85 mm,平均日露水量为 0.08 mm,日露水量最大可达 0.82 mm.日露水量主要分布在 0~0.5 mm,以 0~0.1 mm 分布最多,日露水量大于 0.55 mm 的天数只有 10 d.

2.1.5 露水与降雨的关系 监测期间,降雨发生天数为 134 d,降雨总量为 506.23 mm;有露水凝结的天数为 148 d,露水总量为 29.85 mm.为了分析降雨和露水的日变化特征,将所有监测天数每小时数值进行平均,得到平均露水和平均降雨量的年内日均对比图(图 7a),但现实中降雨与露水一般不会同时发生.可以看出,各时段平均露水量均小于平均降雨量,且露水量低的时段降雨量大,而降雨量低的时段露水量大,说明露水和降雨在时间上形成天然互补.从图 7b 可以看出,相比降雨量,各月露水量较少,平均只占降雨量的 6.1%.由图 7c 可知,降雨在一定程度上影响露水凝结,一般雨后第 1 天露水量最多,雨前 1 天次之,而雨后第 2 天最少.

露水和降雨异时发生,虽然在量值上露水远比降雨小得多,但持续时间远长于降雨,只要露水量大于 0.03 mm 就可被植物吸收利用^[19],露水和雨水的天然互补对于动植物的生长起到关键作用.在干旱半干旱区,尤其在经历严重干旱的季节,露水的作用

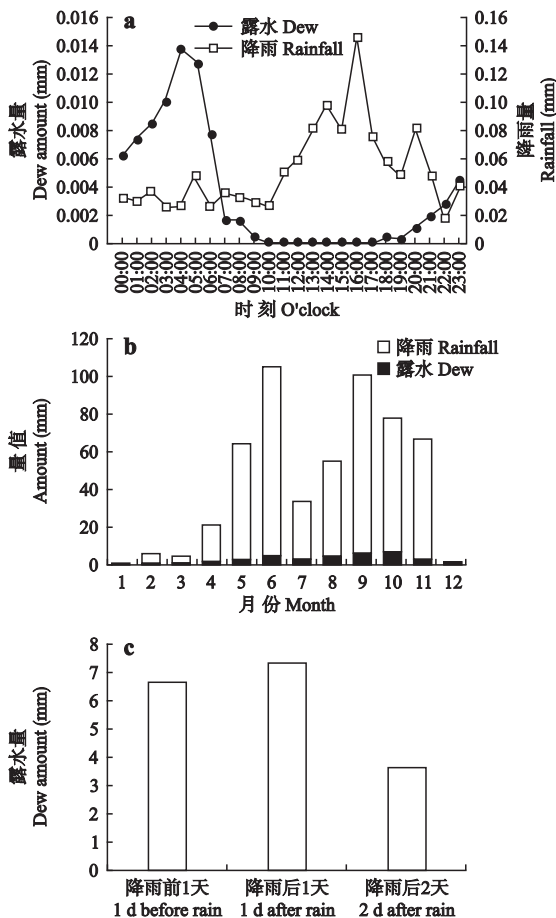


图 7 降雨和露水的关系
Fig.7 Relationship between rain and dew.

a) 降雨与露水量年内日均变化 Daily average variation of rain and dew amount in the year; b) 降雨与露水量月变化 Monthly variation of rain and dew amount; c) 露水量随降雨日变化 Dew amount variation with the day of rain events.

甚至比降雨(降雪)还要突出. 现已证明, 采用不同材料和技术时, 露水收获量可以大大增加^[7], 若科学开发利用, 露水将成为干旱地区又一重要水源.

2.2 大气影响因子

2.2.1 相对湿度 露水量与相对湿度呈显著正相关关系($r=0.726, P<0.01$). 由图 8 可见, 露水量(最大和平均)随相对湿度的增大而增大. 露水主要发生在相对湿度大于 80.0% 的区间, 且在相对湿度 80.0%~95.0% 区间内, 露水量(最大和平均)最大; 相对湿度小于 80.0% 时, 露水发生较少, 且平均露水量只有不足 0.03 mm.

2.2.2 气温-露点差 露水量与气温-露点差呈显著负相关关系($r=-0.725, P<0.01$). 由图 9 可以看出, 露水量(最大和平均)随气温-露点差增大而减小, 且露水主要在气温与露点的差值为 0~2 °C 的区间凝结, 在此区间内, 平均露水量最大, 为 0.22 mm; 在气

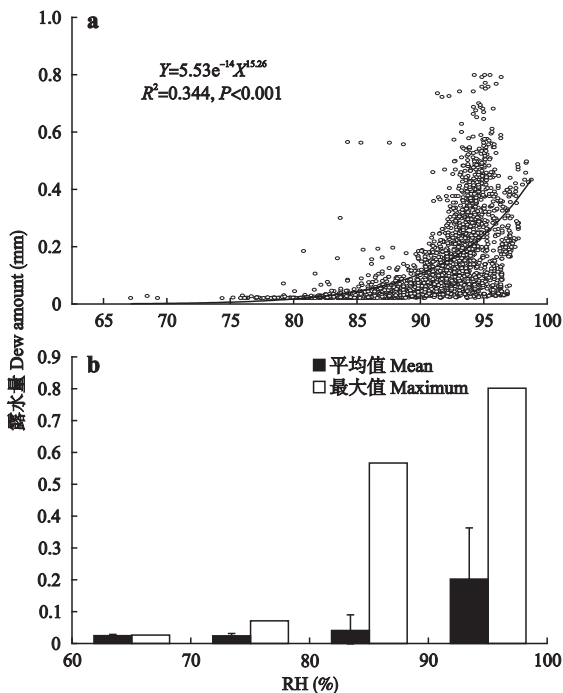


图 8 露水量与相对湿度(RH)的关系
Fig.8 Correlation between dew amount and RH (mean±SD).
a) 露水量与 RH 的回归分析 Regression analysis between dew amount and RH; b) 露水量随 RH 的分布特征 Distribution characteristics of dew amount with RH.

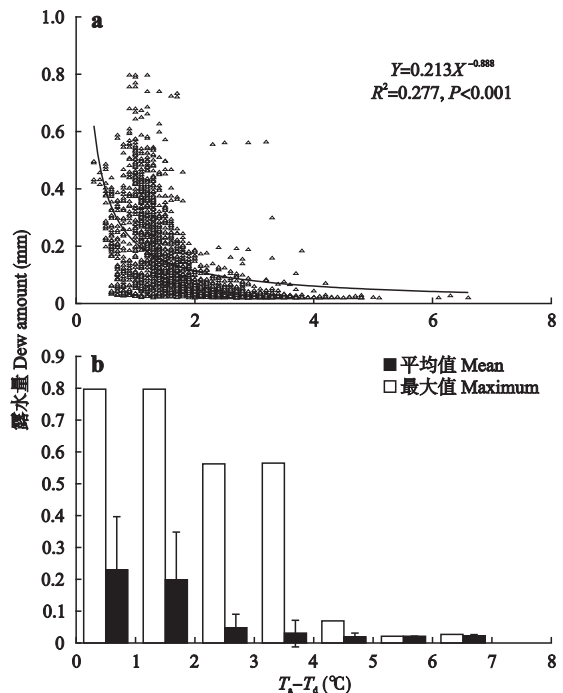


图 9 露水量和气温(T_a)-露点差(T_d)的关系
Fig.9 Relationship between dew amount and T_a-T_d .
a) 露水量与 T_a-T_d 的回归分析 Regression analysis between dew amount and T_a-T_d ; b) 露水量随 T_a-T_d 的分布特征 Distribution characteristics of dew amount with T_a-T_d .

温-露点差大于 4 °C 时露水凝结较少, 且平均露水量不足 0.05 mm.

2.2.3 风速 从图 10 可以看出,露水主要发生在风速为 $0\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区间,露水量与风速之间呈弱相关($r=0.133, P<0.01$).最大露水量随风速增大有减小趋势,但平均露水量却在风速为 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间内达到最大值.在平均风速达到 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时露水量最大,无风时露水量反而减小,可见微风更有利于露水凝结.

2.2.4 风向 由图 11 可以看出,露水主要发生在风向为 $120^{\circ}\sim 150^{\circ}$ (我国东南季风方向)和 $240^{\circ}\sim 330^{\circ}$

(我国西北季风方向)两个区间,但露水值与风向之间呈现弱相关性($r=0.219, P<0.01$).

3 讨 论

本研究结果表明,在安塞地区露水一般于 18:00 开始凝结,凝结量随时间增加,在次日 5:00—7:00 凝结量达到最大;也有研究表明,露水主要凝结时段为 21:00 至次日 8:00,在 4:00—6:00 露水凝结频率最大^[20].由此可知,18:00 至次日 8:00 是露水收集的最佳时段,此后因气温上升、蒸发强度加大,不适合露水收集.同时,露水量明显受季节变化影响,如安塞站露水在秋季凝结量最大(14.42 mm),占全年露水量的 48.4%,主要是因为秋季气温日变幅较大,平均相对湿度较高(76.9%),为露水凝结提供了充足的水汽条件;而夏季多阴雨天气(48 d),降雨前后地表水汽条件供应充足,因而有利于露水凝结;相对而言,春季雨水较少(86.41 mm),占全年降雨量的 17.1%,平均相对湿度仅为 53.2%,且春季多风沙天气^[21],因此露水量较少.

降雨和露水是干旱地区重要的水汽来源,本文发现一般雨后第 1 天露水凝结量最多,雨前 1 天次之,露水突增似乎为降雨前兆(图 7c),雨后第 2 天及以后时段露水量明显减少.该结果与张强等^[14]在黄土高原区的研究结果一致,主要是因为降雨前后大气水汽条件充足,且雨后天气又大多晴朗少云,有利于夜间辐射冷却,而数天后水汽量急速下降,不利于露水凝结.

相对湿度和气温-露点差是主导露水凝结的关键因素^[22].相对湿度越高表明大气越接近饱和状态,相对而言也就越有利于露水凝结.但露水的凝结并不需要相对湿度达到 100%^[23],本研究中露水主要在相对湿度大于 80% 时凝结(图 8a),在相对湿度小于 75% 时几乎没有露水凝结,而且露水凝结量随相对湿度增大而增大,这与 Sharan 等^[22]、Monteith^[23]、Ye 等^[24] 研究结果一致.本研究发现,露水主要在气温接近露点、气温-露点差为 $0\sim 2^{\circ}\text{C}$ 时凝结(图 9a),证明露水是在气温下降至露点之前就开始凝结,而且凝结量随气温-露点差的减小而增大.

相比上述两种因素,风速、风向与露水量之间的相关性较弱(图 10、11).风速对露水的凝结起到双面作用:适宜的风速会促进露水凝结,而较高的风速则会阻碍露水凝结^[25].风速与露水凝结之间的具体关系尚不明确, Monteith^[23] 认为,露水的形成需要风速小于 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; Muselli 等^[26] 发现,风速小于

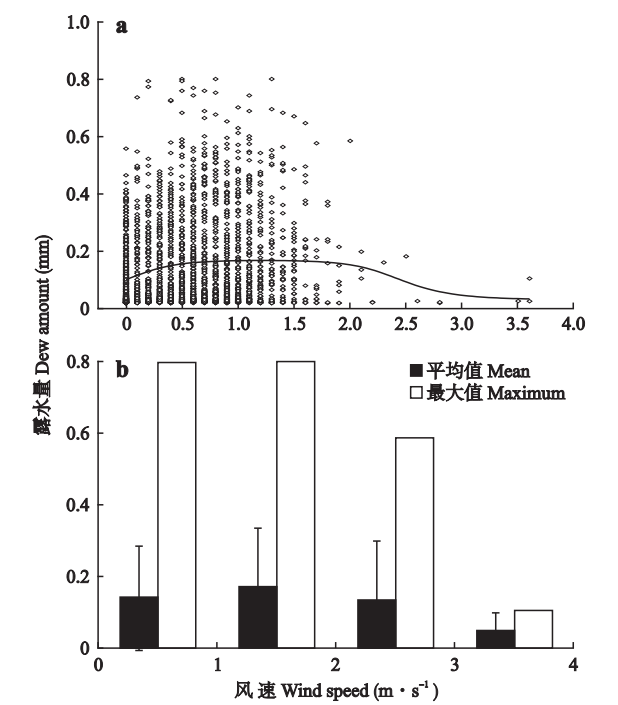


图 10 露水量与风速的关系
Fig.10 Relationship between dew amount and wind speed.
a) 露水量与风速的回归分析 Regression analysis between dew amount and wind speed; b) 露水量随风速的分布特征 Distribution characteristics of dew amount with wind speed.

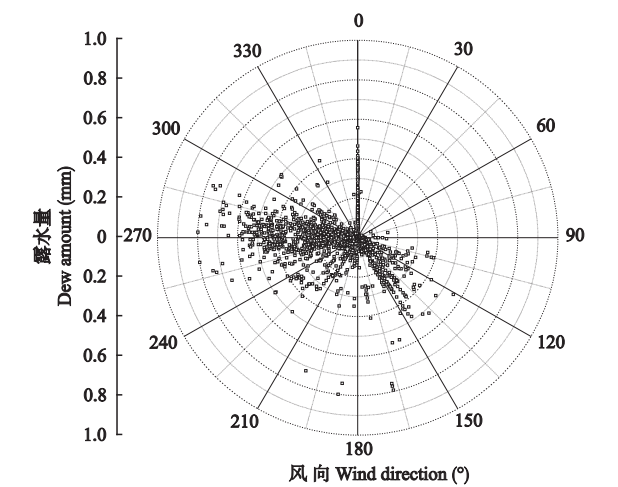


图 11 露水量与风向的关系
Fig.11 Relationship between dew amount and wind direction.

$1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 更有利于露水凝结。本研究中露水主要在风速为 $0 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 区间凝结, 风速大于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时露水凝结较少, 说明较高的风速确实会对露水凝结起到阻碍作用。文中露水量与风速之间呈现弱相关 ($P < 0.01$), 最大露水量随风速增大而减小, 但平均露水量却在风速为 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 区间内达到最大值, 但 Ye 等^[23]在广州地区研究发现露水量与风速之间并没有显著相关性 ($P > 0.05$), 该结果可能与试验地纬度、露水采集器性能和数据采集量等差异有关。风向对露水的作用因区域地理位置和地区主风向而异, 本研究中露水凝结主要受地区主风向影响, 露水恰在主风向为 $120^\circ \sim 150^\circ$ 和 $340^\circ \sim 330^\circ$ 两个区间凝结最多。这与印度 Kothara 地区的研究结果不同^[22], 该区地理位置近海, 季风带来充足水汽条件, 因而在风向为 $0^\circ \sim 100^\circ$ 和 $240^\circ \sim 360^\circ$ 两区间露水更易凝结。

4 结 论

通过对露水量特征及影响因素分析得到以下几个结论: 1) 露水凝结过程受季节和局地微气象条件影响。露水在 5:00—7:00 凝结量最多, 18:00 至次日 8:00 是露水收集的最佳时段; 夏秋季露水量较多, 春冬季较少; 雨前和雨后第 1 天更有利于露水凝结, 雨后第 2 天及以后时段露水凝结较少。2) 相对湿度和气温-露点差是控制露水凝结量的两个重要因素, 露水量与相对湿度呈显著正相关, 与气温-露点差呈显著负相关。风速、风向对露水凝结有一定影响, 但风速、风向与露水量之间的相关性较弱。

由于露水的凝结受下垫面、地表粗糙度等因素影响, 所以本研究结果仅代表该区裸地上方 20 cm 处露水凝结量状况, 另外, 由于结露和蒸发同时存在, 所以本次测定的露水凝结量可能小于实际凝结量, 试验结果较为保守, 更精确的露水量测定有待进一步试验。

致谢 感谢卢玉东、何自立、汪有科、陈云明对试验的关注与帮助; 感谢长安大学研究生院、长安大学水与发展研究院、西北农林科技大学、中国科学院水利部水土保持研究所和中国科学院安塞水土保持试验站对本试验项目的支持。

参考文献

[1] Beysens D. The formation of dew. *Atmospheric Research*, 1995, **39**: 215–237

[2] Khalil B, Adamowski J, Shabbir A, *et al.* A review: Dew water collection from radiative passive collectors to recent developments of active collectors. *Sustainable Water Resources Management*, 2016, **2**: 71–86

[3] Beysens D, Clusc O, Miletac M, *et al.* Collecting dew as a water source on small islands: The dew equipment for water project in Biševo (Croatia). *Energy*, 2007, **32**: 1032–1037

[4] Zhang Q (张 强), Wang S (王 胜), Zeng J (曾 剑). On the non-rained land-surface water component and their relationship with soil moisture content in arid region. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2010, **27** (3): 392–400 (in Chinese)

[5] 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**: 90–98

[6] Li XY. Effects of gravel and sand mulches on dew deposition in the semiarid region of China. *Journal of Hydrology*, 2002, **260**: 151–160

[7] Lekouch I, Lekouch K, Muselli M, *et al.* Rooftop dew, fog and rain collection in southwest Morocco and predictive dew modeling using neural networks. *Journal of Hydrology*, 2012, **448–449**: 60–72

[8] Sharan G, Clus O, Singh S, *et al.* A very large dew and rain ridge collector in the Kutch area (Gujarat, India). *Journal of Hydrology*, 2011, **405**: 171–181

[9] Zhang Q (张 强), Chen L-H (陈丽华), Wen X-M (问晓梅), *et al.* Discuss on techniques of exploitation and utilization of dewfall resource on land surface. *Arid Meteorology* (干旱气象), 2008, **26**(4): 1–4 (in Chinese)

[10] Gao Z-Y (高志永), Wang Y-K (汪有科), Wang X (汪 星), *et al.* Dew amount of jujube plantation in semi-arid loess hilly-gully region. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* (农业机械学报), 2015, **46**(10): 105–115 (in Chinese)

[11] Pedro JJ, Gillespie TJ. Estimating dew duration. I. Utilizing micrometeorological data. *Agricultural Meteorology*, 1981, **25**: 283–296

[12] Yan B-X (阎百兴), Deng W (邓 伟). Study on the dew resource in the Sanjiang Plain. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2004, **19**(6): 732–737 (in Chinese)

[13] Luo W, Goudriaan J. Dew formation on rice under varying durations of nocturnal radiative loss. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, **104**: 303–313

[14] 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): 128–135 (in Chinese)

[15] Gao Z-Y (高志永), Wang Y-K (汪有科), Wei X-G (魏新光), *et al.* Indoor simulation on dew formation on plant leaves. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(3): 725–730 (in Chinese)

[16] Lawrence MJ. The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, **86**: 225–233

[17] Ye Y-H (叶有华), Zhou K (周 凯), Peng S-L (彭少麟), *et al.* Dew condensation in clear night of Cong-

hua City. *Tropical Geography* (热带地理), 2009, **29** (1): 26–30 (in Chinese)

[18] Yan B-X (阎百兴), Wang Y-Y (王毅勇), Xu Z-G (徐治国), *et al.* Study on the dew condensation in the marsh ecosystem in Sanjiang Plain. *Wetland Science* (湿地科学), 2004, **2**(2): 94–99 (in Chinese)

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

[20] Wang H (王 浩), Jia Z-F (贾志峰), Lu Y-D (卢玉东), *et al.* Observational study of dew condensation time and frequency in the loess hilly region of Ansai County, northern Shaanxi Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(8): 2563–2568 (in Chinese)

[21] Wen X-M (问晓梅). Research of Dew and Evaporation Characteristics of Semi-arid Area. Master Thesis. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2009 (in Chinese)

[22] Sharana G, Beysens D, Milimouk-Melnitchouk I. A

study of dew water yields on Galvanized iron roofs in Kothara (North-West India). *Journal of Arid Environments*, 2007, **69**: 259–269

[23] Monteith JL. Dew. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1957, **83**: 322–341

[24] Ye YH, Zhou K, Song L, *et al.* Dew amounts and its correlations with meteorological factors in urban landscapes of Guangzhou, China. *Atmospheric Research*, 2007, **86**: 21–29

[25] Muselli M, Beysens D, Mileta M, *et al.* Dew and rain collection in the Dalmatian Coast, Croatia. *Atmospheric Research*, 2009, **92**: 455–463

[26] 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

作者简介 王 浩,男,1993 年生,硕士研究生.主要从事近地面气态水研究. E-mail: wallhao3@163.com

责任编辑 杨 弘
