

# 毛乌素沙地沙蒿凝结水形成规律及其对水均衡的影响

冉彬, 张在勇\*, 杨京博, 许达, 官程程

(1. 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; 2. 长安大学水利与环境学院, 西安 710054)

**摘要:** 凝结水是干旱半干旱区重要的补给水源, 为了探究毛乌素沙地典型植被沙蒿凝结水的形成过程, 量化凝结水量, 分析气象因素对凝结水的形成贡献, 评价沙蒿凝结水量对水均衡的影响, 该研究在毛乌素沙地基于大型称重式蒸渗仪开展了沙蒿凝结水的实时动态观测研究。研究结果表明, 沙蒿年凝结水生成量为 47.1 mm, 占年降水量的 19.6%, 且寒冷的月份凝结水量高于温暖月份。空气温度与地表温度之差及相对湿度的大小是凝结水形成的重要影响因素。通过增强回归树模型的结果发现, 相对湿度对凝结水形成的贡献率最高, 为 43.4%。考虑沙蒿凝结水量, 水均衡方程的误差能够降至 5.7%, 可提高水资源评价时的精度。该研究可为干旱半干旱地区精确评价水资源量提供重要依据, 同时也将深化沙蒿条件下凝结水对水循环影响的认知, 为旱区植被生态系统的保护提供了科学依据。

**关键词:** 湿度; 温度; 凝结水; 沙蒿; 增强回归树模型; 水均衡; 毛乌素沙地

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301062

中图分类号: S271

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-08-0111-09

冉彬, 张在勇, 杨京博, 等. 毛乌素沙地沙蒿凝结水形成规律及其对水均衡的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8):

111-119. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301062 http://www.tcsae.org

RAN Bin, ZHANG Zaiyong, YANG Jingbo, et al. Dew formation characteristics of *Artemisia ordosica* and its influence on water balance in the Mu Us Sandy Land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(8): 111-119. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301062 http://www.tcsae.org

## 0 引言

凝结水是指当地表温度下降至露点温度后, 空气中的水汽和表层土壤孔隙中的水汽, 在土壤表面或植物表面冷凝形成的液态水<sup>[1-2]</sup>。在干旱半干旱地区, 凝结水是水循环的重要组成部分<sup>[3]</sup>。例如, KIDRON<sup>[4]</sup>在以色列境内的内盖夫沙漠 (Negev Desert) 裸地条件下的研究表明, 年总凝结水量约占年降水总量的 36%。王忠静等<sup>[5]</sup>在黑河流域荒漠站采用涡度相关法计算了荒漠站年凝结水量为 14.82 mm, 占到年降水量的 41.05%。此外, 凝结水不仅是干旱区小型动物、植物和生物结皮等的重要水分来源<sup>[6-8]</sup>, 还对地表水热平衡过程起到重要的作用<sup>[9]</sup>。在干旱时期农作物可以通过叶片吸收凝结水来补充自身需要的水分, 维持自身正常生理活动, 还能够促进种子的发育<sup>[10-11]</sup>。因此, 精确量化凝结水量不仅对水资源的评价和管理有重要的作用, 而且对于维护干旱半干旱地区的生态环境及农业的发展具有重要的实际意义<sup>[12-13]</sup>。

近些年来, 虽然国内外学者开展了大量有关凝结水的相关研究<sup>[14-16]</sup>。然而, 目前对凝结水的观测还较为困

难, 国际上还没有统一和通用的观测凝结水的方法<sup>[17]</sup>。常用的观测或估算凝结水的方法有: 叶片湿度传感器、人造凝结面 (雷克盘、滤纸圆盘等)、微渗仪、铝盒、涡度相关法、Penman-Monteith 公式法和地表能量平衡法等。FENG 等<sup>[18]</sup>使用叶片湿度传感器在青海海北高寒草甸站对凝结水进行了观测, 但由于凝结面为塑料制品与植物叶片存在明显差别, 因此观测结果仅为潜在凝结水量。KIDRON<sup>[4]</sup>使用人造凝结面研究了内盖夫沙漠不同海拔对凝结水的影响, 但该方法不能估算凝结水的形成速率与持续时间。郭晓楠等<sup>[19]</sup>使用涡度相关法估算了宁夏盐池沙生灌木的凝结水量, 结果发现涡度相关法在低风速的夜晚, 严重低估凝结水量。王忠静等<sup>[5]</sup>采用涡度相关法估算了黑河流域 9 个站点不同下垫面下的凝结水量, 并且评价了裸地条件下凝结水量对水量平衡方程的影响, 指出使用涡度相关法估算的凝结水量或低于实际凝结水量。GROH 等<sup>[20]</sup>使用 Penman-Monteith 公式法估算了奥地利斯蒂里亚恩斯山谷中的凝结水量, 结果发现在寒冷的条件下该方法计算的凝结水量低估了实际凝结水量。TOMASZKIEWICZ 等<sup>[21]</sup>使用地表能量平衡法, 计算了地中海流域附近 142 个地区的凝结水量。张强等<sup>[17]</sup>指出该方法的影响因素众多, 可靠性较差。目前微渗仪被广泛用于测定凝结水量<sup>[22]</sup>。然而, 当日尺度凝结水量较小时, 使用微渗仪可能会导致较大的观测误差<sup>[23]</sup>, 并且微渗仪的埋深深度一直存在争议<sup>[24]</sup>。此外, 使用微渗仪无法测定灌木叶片表面形成的凝结水量。ROSENBERG<sup>[25]</sup>指出称重式蒸渗仪是目前使用观测凝结水量最精确的方法, 但由于其价格昂贵, 使用较少。

毛乌素沙地位于黄河的中游, 是中国典型的半干

收稿日期: 2023-01-13 修订日期: 2023-03-08

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41902249); 陕西省留学人员科技活动择优资助项目 (2020006); 陕西省重点研发计划 (No.2020SF-405, 2021ZDLSF05-01); 中央高校基本科研业务费资助项目 (300102292201)

作者简介: 冉彬, 研究方向为干旱半干旱区凝结水的形成与影响机制。

Email: binranchd@126.com

\*通信作者: 张在勇, 博士, 副教授, 研究方向为旱区地下水水资源合理利用与数值模拟。Email: zaiyongzhang@126.com

旱区,其降水量稀少且在时间上分布极不均匀,凝结水对该区生态系统的水分循环具有十分重要的意义。尽管该地区开展了一些凝结水方面的相关研究,但是多数使用微渗仪研究裸地条件下凝结水的形成过程和水汽来源等<sup>[16,26-27]</sup>。例如,陈晓涵等<sup>[28]</sup>研究了2021年7—9月毛乌素沙地南缘固沙灌木丛下地表凝结水的形成特征。李洪波等<sup>[26]</sup>研究了2008年9月和10月土壤凝结水的水汽来源。钱连红等<sup>[29]</sup>探讨了2007年7—10月不同下垫面对土壤吸湿凝结水量的影响。然而,上述研究存在监测时间短和频率低等问题。对于毛乌素沙地典型植被凝结水的形成过程、影响因素及对水均衡的影响还不是很清楚。

为了防止荒漠化和水土流失,毛乌素沙地开展了一系列的植树造林活动<sup>[30]</sup>。沙蒿由于具有耐干旱、能够较好地防风固沙等优点而在当地广泛地种植。目前,沙蒿(*Artemisia ordosica*)的种植面积占毛乌素沙地面积的30%以上<sup>[31]</sup>。因此,量化地研究毛乌素沙地沙蒿凝结水的形成规律,评价其对水均衡的影响,对于干旱半干旱地区的水资源评价及生态环境保护具有重要的意义。

基于此,本研究使用大型称重式蒸渗仪,在毛乌素沙地开展沙蒿条件下凝结水量的观测研究,分析气象要素对凝结水形成的影响,量化气象要素对凝结水形成的贡献,并评价沙蒿凝结水量对水均衡的影响。以期深化对干旱半干旱地区沙蒿条件下凝结水形成过程的认识,助力于区域水资源的合理开发利用与管理。

## 1 材料与方法

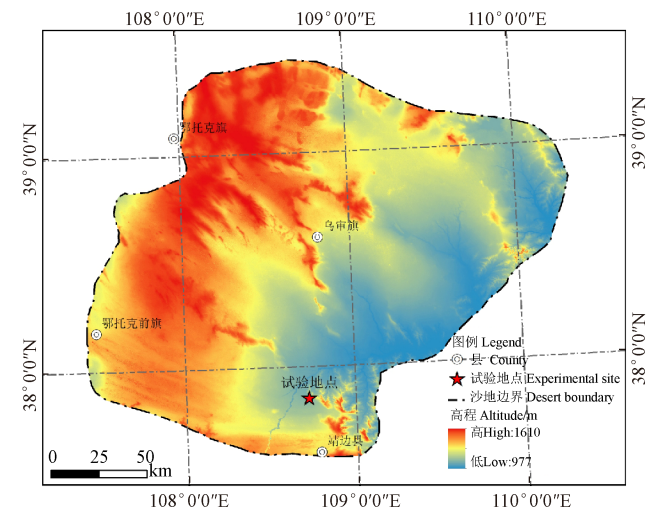
### 1.1 研究区概况

毛乌素沙地(37.45°~39.37°N、107.67°~110.5°E,高程977~1 610 m)位于黄河的中游,处于陕西省、内蒙古自治区的交界处,面积约为3.45万km<sup>2</sup><sup>[32]</sup>。试验观测点(37.8°N、108.7°E)位于乌审旗河南乡,其海拔为1 254.7 m,位于毛乌素沙漠腹地(图1)。该区常年干燥少雨,属于半干旱区,年平均气温为8.1℃(1954—2014年),年平均降水量为292.0 mm(1981—2020年)<sup>[33]</sup>,年均降水量波动较大,蒸发强烈,年均潜在蒸散发2 024.0 mm<sup>[34]</sup>。土壤以风沙土和黑垆土为主<sup>[35]</sup>。

### 1.2 试验设计

试验使用的大型称重式蒸渗仪由原状土体、称重系统和水分监测系统共同构成。蒸渗仪直径0.8 m,深度1.5 m。蒸渗仪最小分辨率为20 g(对应0.039 8 mm的水深)。2台蒸渗仪并排放置,分别为沙蒿和裸地。选择试验区长势良好的沙蒿(2020年8月测得沙蒿株高42.0 cm,冠幅37.0 cm),在不破坏土壤结构的情况下,将蒸渗仪内筒垂直插入种有沙蒿的土壤中。在蒸渗仪的剖面距离地表5、20、40、60、80及100 cm的位置上装有监测土壤含水率和温度的传感器(型号5TE,美国Decagon公司),用来实时观测土壤剖面含水率和温度的变化。在沙蒿的近地表的冠层和蒸渗仪表面分别安装有环境温湿度仪(型号EL-USB-1,英国Lascar Electronics公司),

用来监测地表及沙蒿冠层中的温度和相对湿度。此外,试验场中安装有全自动小型气象站,用来监测试验场的空气温度、相对湿度、净辐射、降水量及风速等气象数据。蒸渗仪、气象要素、含水率及温湿度数据的监测频率均为10 min/次。本研究的观测数据时间为2020年10月1日—2021年9月30日。



注:毛乌素沙地边界范围来源于LIANG等<sup>[32]</sup>的研究。

Note: The boundary of the Mu Us Sandy Land is from LIANG et al.<sup>[32]</sup>.

图1 毛乌素沙地高程分布与试验观测点的位置

Fig.1 Distribution of elevation and location of experimental point in the Mu Us Sandy Land

为了解试验区土壤的粒径组成成分,在蒸渗仪的旁边沿垂向剖面在土壤表面0~10 cm和>10~20 cm处,用环刀进行取样,并送至西北农林科技大学旱区节水农业研究院实验室进行颗粒分析试验。实验室测得土壤表层0~20 cm土壤粒径91%以上在0.075~0.250 mm之间,根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145-2007)<sup>[36]</sup>表层土壤定名为细砂。

### 1.3 凝结水观测

本研究使用季辰等<sup>[37]</sup>提出的蒸渗仪数据处理方法,对监测到的蒸渗仪质量数据进行预处理。一段时间内各数据与其平均值的偏移量需要小于一个阈值( $\delta$ ),保留满足式(1)的数据,剔除不满足条件的数据。

$$|x_i - \bar{x}| < \delta \quad (1)$$

式中 $x_i$ 为蒸渗仪监测的第 $i$ 个质量数据; $\bar{x}$ 为数据的平均值; $\delta$ 一般取数据标准差的1.5倍。在满足条件的数据中按照公式(2)计算凝结水:

$$\Delta m = y_{i+1} - y_i \quad (2)$$

式中 $\Delta m$ 为蒸渗仪质量差; $y_i$ 为 $i$ 时刻筛选后蒸渗仪质量数据; $y_{i+1}$ 为 $i+1$ 时刻筛选后蒸渗仪质量数据。

有研究指出,可以使用无降水,晴朗的日落和次日日出期间的蒸渗仪质量的增加量来表示凝结水<sup>[8,20,38]</sup>。当蒸渗仪质量差 $\Delta m$ 为正值时,表明有凝结水的生成。将以质量表示的凝结水量换算成以深度表示的凝结水量,计算式<sup>[39-40]</sup>为

$$D = 10 \Delta m / \rho \pi r^2 \quad (3)$$

式中  $D$  为凝结水量, mm;  $r$  为蒸渗仪的半径, cm;  $\rho$  为水的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。需要特别指出的是, 本研究观测和统计得到的凝结水量为大气凝结水量, 包括露水、雾水以及霜。

#### 1.4 增强回归树模型

增强回归树 (boosted regression tress, BRT) 模型结合了机器学习和统计学中的 2 种方法, 分别为分类回归树 (regression tree) 和增长 (boosting)。该模型的原理是, 在运行过程中随机抽取一部分数据, 产生大量具有固定节点数的森林模型, 建立因变量与自变量的拟合曲线, 使用剩余数据对拟合结果进行检验, 输出多重回归树的平均值<sup>[41]</sup>。BRT 模型能够允许缺失值数据, 能够拟合复杂非线性关系, 输出自变量对于因变量的相对贡献, 以及其他自变量取均值或不变的情况下, 该自变量与因变量的相互关系 (边际效应), 该关系可反映在不同阈值区间内自变量对于因变量的贡献程度<sup>[42-43]</sup>。最后将所有预测因子的相对重要性之和设置为 1.0, 使用百分数表示自变量对因变量的重要性<sup>[44]</sup>。

BRT 模型参数包括: 决策树复杂程度 (tree complexity,  $t_c$ ), 学习速率 (learning rate,  $l_r$ ), 分割比率 (bag fraction,  $b_g$ ), 树数量 (tree number,  $n_t$ )。本研究使用受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线下的面积 (area under ROC curve, AUC) 来评估 BRT 模型的精度。AUC 值越大代表模型准确性越高, 当 AUC 大于 0.9 时表示模型非常优秀<sup>[45]</sup>。本研究在 R 4.1.3 软件上利用 Dismo 和 Gbm 软件包实现 BRT 的计算<sup>[44]</sup>。本文测试了 1 000 种参数组合, 当模型的参数  $t_c$  为 8,  $l_r$  为 0.001,  $b_g$  为 0.75 (每次随机抽取 75% 数据进行模型构建, 并进行 10 次交叉验证),  $n_t$  为 1 900 时, AUC 最大为 0.96。利用构建的 BRT 模型量化分析气象要素 (相对湿度、风速、净辐射、空气温度及饱和水汽压差) 与凝结水量的关系和对凝结水量的贡献率。

#### 1.5 水均衡方程

为了研究沙蒿凝结水量对水循环的影响, 本研究评价了考虑沙蒿凝结水量对水均衡方程的影响。朱新军等<sup>[46]</sup>指出对于闭合流域且无跨流域调水时的水均衡方程为

$$P=E+R+\Delta S \quad (4)$$

式中  $P$  为降水量, mm, 是流域的输入量;  $E$  为垂向蒸散发量, mm;  $R$  为侧向地表水及地下水出流量之和, mm,  $E$  和  $R$  为输出量;  $\Delta S$  为土壤水、地表水及地下水之和的储存量变化, mm。需要指出的是, 试验期间蒸渗仪表面无地表径流, 也无侧向补给。底部的渗漏量可以通过蒸渗仪观测得出。根据 ZHANG 等<sup>[47-48]</sup>的研究, 蒸渗仪中土壤水储量变化可通过含水率数据获得。

王忠静等<sup>[5]</sup>将凝结水项计入在水均衡方程中, 原水均衡方程变为

$$P=E-D+R+\Delta S \quad (5)$$

式中  $D$  为凝结水量, mm。

## 2 结果与分析

### 2.1 凝结水量及其形成特征

通过称重式蒸渗仪观测得到的 2020 年 10 月 1 日—2021 年 9 月 30 日的总凝结水量为 47.1 mm, 研究期内总降水量为 240.3 mm, 凝结水量占降水量的 19.6%。图 2 为凝结水量和降水量的月变化趋势。由图中可知, 凝结水主要在 2020 年 10 月—2021 年 1 月期间形成, 其中 2020 年 12 月凝结水量最多为 9.00 mm, 2021 年 6 月凝结水量最少为 0.55 mm (图 2)。

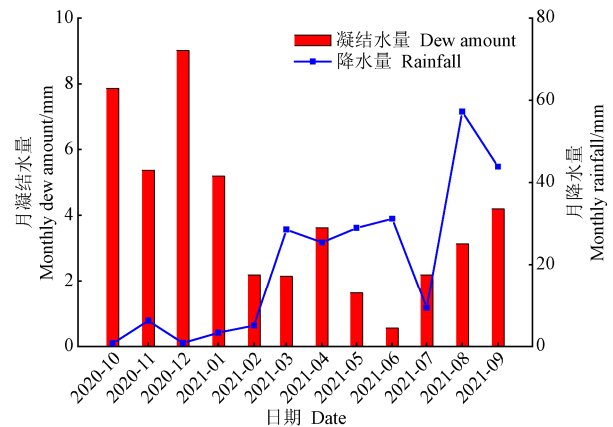


图 2 降水量与凝结水量的月变化趋势  
Fig.2 Dynamics of monthly rainfall and dew amount

为了详细地了解凝结水形成的过程, 本研究分别在凝结水形成较多和较少的月份各自选取了一个典型日深入剖析并且对比凝结水的形成过程。所选取的 2 个典型日为 2020 年 10 月 6 日 12:00 至 7 日 12:00 和 2021 年 7 月 5 日 12:00 至 6 日 12:00。2 个典型日期间天气晴朗, 无降水事件的发生。其中, 2020 年 10 月 6 日 12:00—7 日 12:00, 凝结水量为 0.55 mm, 而 2021 年 7 月 5 日 12:00—6 日 12:00, 凝结水量为 0.10 mm。为了表述方便, 本研究将 2020 年 10 月 6 日 12:00 至 7 日 12:00 称之为典型日 1, 而将 2021 年 7 月 5 日 12:00 至 6 日 12:00 称之为典型日 2。图 3a 和 3b 分别表示典型日 1 和 2 的相对湿度、空气温度和地表温度的日变化特征曲线, 图 3c 为两个典型日凝结水量日动态变化, 其中负值代表蒸散发量, 正值代表凝结量。

典型日 1, 凝结水的形成时间为 18:00 至次日 06:00。在 17:00 前, 空气温度一直小于地表温度, 此时蒸发作用占主导作用, 没有凝结水的形成。17:30 至次日 07:00 期间, 空气温度大于地表温度, 空气中的水汽在温度梯度的作用下向地表运移并在土壤或沙蒿表面凝结, 形成凝结水 (图 3c)。在 00:00 至 06:00 之间, 空气中的相对湿度逐渐增加至饱和状态, 促进凝结水的生成, 凝结水的生成量增加 (图 3c)。在日出后, 地表温度开始高于空气温度, 凝结水量逐渐减小至零 (图 3c)。

典型日 2 (图 3b), 凝结水的形成时间为 22:00 至次日 03:30。在 21:20 至次日 03:20 期间, 地表温度低于空气温度, 此时凝结水开始逐渐形成 (图 3c)。而在 03:40

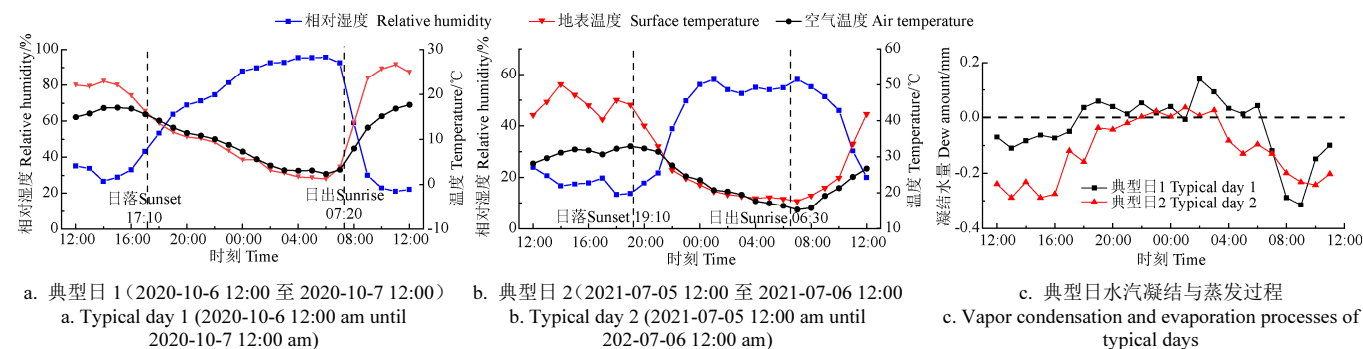


时,地表温度开始高于空气温度,此后以蒸发作用为主,无凝结水形成。

## 2.2 植被对凝结水形成的影响

为了研究植被对凝结水形成的影响,本研究特别对比分析了典型日 1 沙蒿和裸地条件下凝结水量的差异。典型日 1,沙蒿条件下形成的凝结水量为 0.55 mm,而裸地条件下的凝结水量为 0.39 mm。图 4a 为沙蒿与裸地条件下相对湿度、空气温度和沙蒿温度(裸地温度)的日变化特征曲线,图 4b 表示沙蒿与裸地条件下生成凝结水

量的日动态变化对比图。由图 4 可知,自傍晚 18:00 至次日早上的 07:00 沙蒿近地表冠层温度整体上低于裸地的温度,沙蒿与空气的温度差高于裸地与空气温度之差,且沙蒿低于空气温度持续时间(12 h)相较于裸地时间(8 h)更长(图 4a),有利于凝结水的形成。同时,夜间 20:00 至次日凌晨 08:00,沙蒿冠层平均相对湿度为 84.5% 比裸地夜间平均相对湿度高 4.4%。尤其 02:00 以后,沙蒿条件下的相对湿度明显高于裸地条件下的相对湿度,其凝结水的生成量也较裸地条件下高。



注:图 c 中纵坐标负值表示蒸发散。

Note: In figure c the negative value of vertical axis means evapotranspiration.

图 3 典型日相对湿度、地表温度、空气温度及凝结水量的变化趋势

Fig.3 Variation trend of the typical daily of relative humidity, surface temperature, air temperature and dew amounts

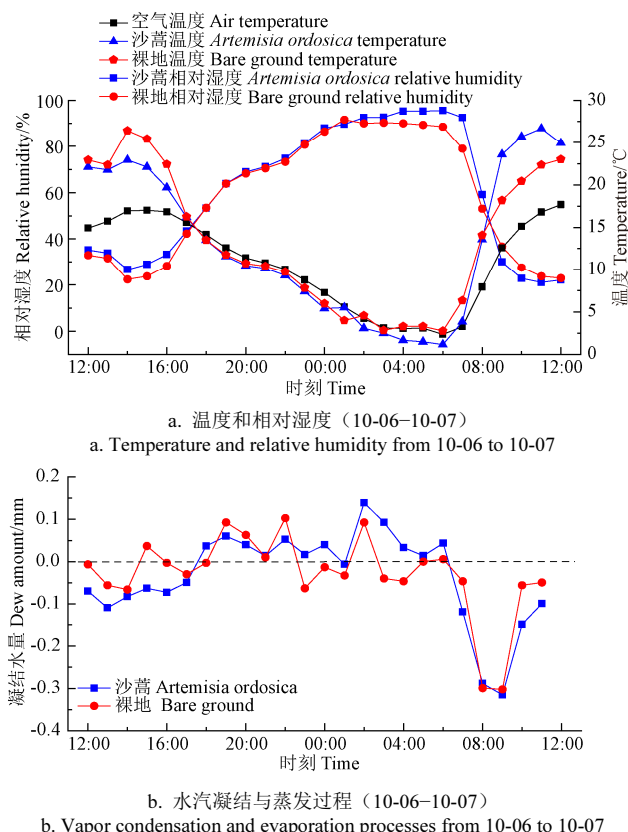


图 4 沙蒿和裸地条件下气象要素及凝结水量

Fig.4 Meteorological factors and dew amount under *Artemisia ordosica* and bare ground conditions

## 2.3 气象要素对凝结水形成的贡献

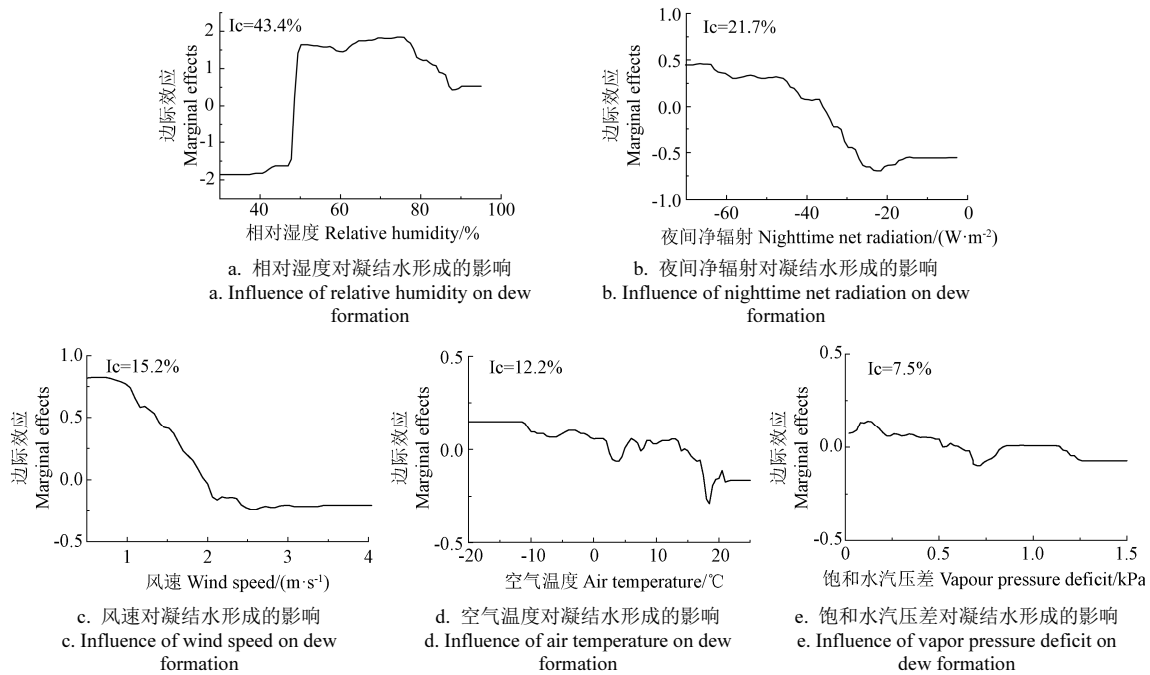
通过 BRT 模型计算得出试验期间各夜间气象要素对凝结水形成的相对贡献如图 5 所示,折线图表示在其他

自变量取均值时,该自变量对凝结水形成的相关关系(边际效应)。

在气象要素中相对湿度对凝结水形成的贡献率最高为 43.4%,是影响凝结水形成的主要因素。根据图 5a,当相对湿度大于 53% 时,相对湿度对凝结水形成呈正向作用。夜间净辐射对凝结水形成的贡献率为 21.7%,当夜间净辐射小于  $-37 \text{ W/m}^2$  时,净辐射对凝结水的形成呈正向作用(图 5b)。图 5c 显示,风速对凝结水形成的贡献为 15.2%,当风速在  $0.5 \sim 1.8 \text{ m/s}$  时风速对凝结水的形成呈正向作用。当风速大于  $1.8 \text{ m/s}$  时,风速对凝结水的形成呈负向作用,说明此时风速会阻碍甚至抑制凝结水的形成。图 5d 显示,空气温度对凝结水形成的贡献为 12.2%,当空气温度小于  $14.5^\circ\text{C}$  时,对凝结水的形成呈正向作用。空气温度大于  $14.5^\circ\text{C}$  时,对凝结水的形成呈负向作用。图 5e 表明,饱和水汽压差对凝结水形成的贡献率最小为 7.5%,当饱和水汽压差小于  $0.6 \text{ kPa}$  时,对凝结水的形成呈正向作用,大于  $0.6 \text{ kPa}$  时,对凝结水的形成呈负向作用。

## 2.4 沙蒿凝结水量对水均衡的影响

试验期间,研究区的降水量为  $240.3 \text{ mm}$ ,凝结水量为  $47.1 \text{ mm}$ ,沙蒿蒸散发量为  $446.5 \text{ mm}$ ,降水渗漏量为 0 (研究时段内未监测到渗漏量),土壤水储量变化为  $-145.3 \text{ mm}$ 。根据水均衡方程式(4),计算得到水均衡误差为  $-60.9 \text{ mm}$ 。试验期间,无地表径流和侧向补给,因此这个结果存在明显的误差,且误差约占年降水量的 25.3%。将年凝结水量带入到水均衡方程式(5),计算得到的水均衡误差为  $-13.8 \text{ mm}$ ,误差仅占降水量的 5.7%。考虑沙蒿凝结水量,可以提高水均衡方程的精确度,有利于提高水资源评价的精度。



注:  $I_c$  为气象要素对凝结水形成的相对贡献率。纵坐标数值大于 0 表示自变量对因变量的变化呈正向作用, 促进凝结水的形成, 反之则反<sup>[49]</sup>。

Note:  $I_c$  represents the relative contributions of meteorological factors to dew formation. A value greater than 0 on the vertical axis indicates that the independent variable has a positive effect on the dependent variable and thus promotes dew formation, and vice versa<sup>[49]</sup>.

图 5 气象要素对凝结水形成的相对贡献及其边际效应

Fig.5 Relative contributions of meteorological factors to dew formation and marginal effects

### 3 讨论

本研究量化了夜间沙蒿凝结水(露水、雾水以及霜)的形成规律。空气温度与地表温度之间的温度梯度是凝结水形成的必要条件。当空气温度高于地表温度时, 空气中的水汽在温度梯度的作用下向地表运移并凝结。空气中的相对湿度大小是凝结水形成的关键。通过 BRT 模型分析, 当空气中的相对湿度大于 53% 时, 有利于凝结水的形成, 且在年尺度上, 相对湿度对凝结水形成的贡献最高为 43.4%。本研究中, 典型日 2 的凝结水形成量低于典型日 1 (图 3c)。这是因为在典型日 2 的地表温度低于空气温度的持续时间仅有 5.5 h, 远低于典型日 1 的持续时间 12 h。此外, 典型日 2 夜间空气相对湿度不超过 60%, 空气中水汽含量远低于典型日 1。因此, 典型日 2 的凝结水形成量小于典型日 1。

凝结水量在不同月份上的形成时间和数量存在差异。在寒冷月份(2020 年 10 月—2021 年 1 月)凝结水的形成量远高于温暖的月份(5 至 7 月)。其主要原因与上述分析一致, 寒冷月份发生凝结的夜晚其地表温度低于空气温度持续的时间(平均持续时间为 8.7 h)相较于温暖月份发生凝结的时间(5.8 h)会更长。此外, 在寒冷的月份夜间平均相对湿度为 68.6%, 而温暖的月份夜间相对湿度为仅为 51.8%。寒冷的月份和温暖月份的相对湿度分别大于和小于有利于凝结水形成相对湿度的 53%。因此, 较为寒冷的月份凝结水的形成量明显高于温暖的月份。

其他的气象要素, 包括风速、夜间净辐射、饱和水汽压差等会影响空气凝结水的形成。在年尺度上, 相对湿度、夜间净辐射及风速对凝结水的形成贡献率最大。

其中, 相对湿度对凝结水形成的贡献最大。李玉灵等<sup>[50]</sup>基于微渗仪的观测数据采用多元相关分析的方法研究了 2002 年 5、8、9 和 10 月毛乌素臭柏群落条件下凝结水的影响因素, 发现风速与凝结水量之间存在较高的相关性, 与本研究存在差异。一方面, 这可能与观测数据的时间长度有关, 该研究仅观测了 4 个月的数据且每月的观测时间仅有 5 d, 而本研究基于 1 a 连续的实时监测数据; 另一方面, 李玉灵等<sup>[50]</sup>采用微渗仪观测的凝结量不包括植物叶片生成的凝结量, 而本研究采用称重式蒸渗仪测得的凝结量更为全面。BEYSENS<sup>[14]</sup>指出, 在夜间通过辐射冷却即使地表温度迅速低于空气温度, 因此促进凝结水的形成。此外, 本研究的结果表明, 当风速在 0.5~1.8 m/s, 有助于凝结水的形成; 而当风速大于 1.8 m/s 时, 阻碍甚至抑制凝结水的形成。这是因为当风速较小时不利于空气中水汽的传输, 而强风会降低空气温度与凝结面之间的温度差, 使得凝结面难以达到露点温度<sup>[51]</sup>。

本研究的数据显示, 沙蒿会通过改变周边环境的空气温度和相对湿度而影响凝结水的形成。PAN 等<sup>[52]</sup>指出, 夜间植物的蒸腾作用使得植物周边空气相对湿度相较于裸地会更高。随着植物热量的散失, 植物叶片温度下降, 冠层高度处水汽遇到较冷的植物枝叶就会形成相对较多的凝结水<sup>[53]</sup>。加之, 植物相较于地表土壤夜间的保温效果较差, 夜间更易降温达到露点温度, 更有利于凝结水的形成<sup>[54]</sup>。

凝结水是干旱半干旱区水循环的重要组成部分, 本研究的结果显示沙蒿年度凝结水量占降水量的 19.6%。考虑凝结水量的情况下, 可以将水均衡方程的误差大大降低, 深化了对沙蒿影响水循环的认识。此外, 有研究表明凝结水是沙蒿在干旱时维持生存的重要水分来源<sup>[38]</sup>。

## 4 结 论

本研究使用大型称重式蒸渗仪,在毛乌素沙地原位试验场中实时观测 2020 年 10 月—2021 年 9 月期间的沙蒿凝结水的形成量,分析了沙蒿凝结水的形成过程,且应用 BRT 模型量化了气象要素对凝结水形成的贡献率及其边际效应,量化评价了沙蒿凝结水量对水均衡方程的影响,主要可以获得以下几个结论:

1) 在 2020 年 10 月—2021 年 9 月,沙蒿凝结水的形成量为 47.1 mm,占年降水量的 19.6%。凝结水主要形成在较寒冷的月份,且较寒冷月份的凝结水的形成量大于温暖月份。试验期间,12 月份的凝结水量最多(9.00 mm),而 6 月份的凝结水量最少(0.55 mm)。

2) 相对湿度的对凝结水形成的贡献最大为 43.4%,夜间净辐射与风速的贡献分别为 21.7%和 15.2%。空气温度与饱和水汽压差对凝结水的形成的贡献并不突出。相对湿度大于 53%时,有利于凝结水的形成;夜间净辐射小于 $-37\text{ W/m}^2$ 时,有利于凝结水的形成;而风速在 0.5~1.8 m/s 时,有利于凝结水的形成。

3) 沙蒿可通过改变周边的相对湿度和温度而影响凝结水的形成。在干旱半干旱地区,沙蒿凝结水量是水循环的重要组成部分,考虑沙蒿凝结水量,能将水均衡方程的误差减小至 5.7%,可提高水资源评价的精度。该研究可深化对沙蒿影响水循环的认识且为精确评价水资源量提供依据。

本文量化观测研究了沙蒿凝结水量不仅对于提高水资源的评价的精度有重要的作用,同时对于维持生态环境具有重要的意义。需要特别指出的是,本研究仅对气象因素对凝结水形成的影响进行了分析。而植被的特征及土壤的类型与性质等也是凝结水形成的重要因素。因此,在未来的研究中,需要进一步考虑上述因素对凝结水形成的影响及贡献。同时,对于量化沙蒿在应对干旱时所需的凝结水量及其凝结水的具体来源还有待进一步的探究。

### [参 考 文 献]

[1] 侯新伟,陈浩,李向全,等.中国北方土壤凝结水研究综述[J].工程勘察,2009,37(8):42-46.  
HOU Xinwei, CHEN Hao, LI Xiangquan, et al. An overview on soil condensate in North of China[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 37(8): 42-46. (in Chinese with English abstract)

[2] 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):160-164.  
GUO Zhanrong, LIU Jianhui. An overview on soil condensate in arid and Semiarid Regions in China[J]. Arid Zone Research, 2005, 22(4): 160-164. (in Chinese with English abstract)

[3] HAO X, CONG L, 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[J]. Journal of Hydrology, 2012, 472: 90-98.

[4] KIDRON G J. Altitude dependent dew and fog in the Negev Desert, Israel[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1999, 96(1): 1-8.

[5] 王忠静,张子雄,索滢.干旱区凝结水评估及对水量平衡方程影响[J].水利学报,2019,50(6):710-720.  
WANG Zhongjing, ZHANG Zixiong, SUO Ying. A new water balance equation introducing dew amount in arid area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(6): 710-720. (in Chinese with English abstract)

[6] RAO B, LIU Y, WANG W, et al. Influence of dew on biomass and photosystem II activity of cyanobacterial crusts in the Hopq Desert, northwest China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(12): 2387-2393.

[7] 潘颜霞,王新平,张亚峰,等.沙坡头地区吸湿凝结水对生物土壤结皮的生态作用[J].应用生态学报,2013,24(3):653-658.  
PAN Yanxia, WANG Xinping, ZHANG Yafeng, et al. Ecological effect of hygroscopic and condensate water on biological soil crusts in Shapotou region of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(3): 653-658. (in Chinese with English abstract)

[8] 李胜龙,肖波,孙福海.黄土高原干旱半干旱区生物结皮覆盖土壤水汽吸附与凝结特征[J].农业工程学报,2020,36(15):111-119.  
LI Shenglong, XIAO Bo, SUN Fuhai. Characteristics of water vapor sorption and condensation in biocrusts covered surface soil in arid and semiarid areas of the Loess Plateau, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(15): 111-119. (in Chinese with English abstract)

[9] DAWSON T E, GOLDSMITH G R. The value of wet leaves[J]. New Phytologist, 2018, 219(4): 1156-1169.

[10] 马瑞莎,乔长录,葛瑞晨.膜下滴灌棉田凝结水量研究[J].灌溉排水学报,2021,40(5):93-99.  
MA Ruisha, QIAO Changlu, GE Ruichen. Study of dew in cotton field under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(5): 93-99. (in Chinese with English abstract)

[11] YOKOYAMA G, YASUTAKE D, WANG W, et al. Limiting factor of dew formation changes seasonally in a semiarid crop field of northwest China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 311: 108705.

[12] 龚雪伟,吕光辉,冉启洋,等.狭果鹤虱幼苗营养生长和生物量分配对凝结水梯度的响应[J].应用生态学报,2016,27(7):2257-2263.  
GONG Xuwei, LV Guanghui, RAN Qiyang, et al. Response of vegetative growth and biomass allocation of Lappula semiglabra seedlings to dew gradient[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(7): 2257-2263. (in Chinese with English abstract)

[13] ZHUANG Y, RATCLIFFE S. Relationship between dew presence and Bassia dasyphylla plant growth[J]. Journal of Arid Land, 2012, 4(1): 11-18.

- [14] BEYSENS D. The formation of dew[J]. *Atmospheric Research*, 1995, 39(1): 215-237.
- [15] 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, 30(2): 6-10.  
CAO Wenbing, WAN Li, ZHOU Xun, et al. A preliminary study of the formation mechanism of condensation water and its effects on the ecological environment in northwest China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2003(2): 6-10. (in Chinese with English abstract)
- [16] 罗玉昌, 王哲, 赵平和. 毛乌素沙地土壤凝结水试验研究[J]. *内蒙古气象*, 2007(4): 35-38.  
LUO Yuchang, WANG Zhe, ZHAO Heping. Experimental study on soil condensation in Mu Us Desert[J]. *Meteorology Journal of Inner Mongolia*, 2007(4): 35-38. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张强, 问晓梅, 王胜, 等. 关于陆面降露水测量方法及其开发利用研究[J]. *高原气象*, 2010, 29(4): 1085-1092.  
ZHANG Qiang, WEN Xiaomei, WANG Sheng, et al. On measuring methods and exploitation technology for dewfall on land surface[J]. *Plateau Meteorology*, 2010, 29(4): 1085-1092. (in Chinese with English abstract)
- [18] FENG T, ZHANG L, CHEN Q, et al. Dew formation reduction in global warming experiments and the potential consequences[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 593: 125819.
- [19] 郭晓楠, 查天山, 贾昕. 典型沙生灌木生态系统凝结水量估算[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(10): 80-87.  
GUO Xiaonan, ZHA Tianshan, JIA Xin. Estimation of dewfall amount in a typical desert shrub ecosystem[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38(10): 80-87. (in Chinese with English abstract)
- [20] GROH J, SLAWITSCH V, HERNDL M, et al. Determining dew and hoar frost formation for a low mountain range and alpine grassland site by weighable lysimeter[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 372-381.
- [21] TOMASZKIEWICZ M, NAJM M A, BEYSENS D, et al. Projected climate change impacts upon dew yield in the Mediterranean basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566/567: 1339-1348.
- [22] 贾志峰, 陈丹姿, 王智, 等. 关中平原土壤凝结水量及水汽来源特征[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(2): 369-376.  
JIA Zhifeng, CHEN Danzi, WANG Zhi, et al. Characteristics and source of soil condensation water in Guanzhong Plain, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(2): 369-376. (in Chinese with English abstract)
- [23] AGAM N, BERLINER P R. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments: A review[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 65(4): 572-590.
- [24] 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[J]. *Atmospheric Research*, 2002, 64(1): 323-334.
- [25] ROSENBERG K J. *Microclimate: The Biological Environment*[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1983.
- [26] 李洪波, 白爱宁, 张国盛, 等. 毛乌素沙地土壤凝结水来源分析[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(2): 241-246.  
LI Hongbo, BAI Aining, ZHANG Guosheng, et al. Analysis on soil condensation water source in Mu Us sandland[J]. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(2): 241-246. (in Chinese with English abstract)
- [27] 尹瑞平, 吴永胜, 张欣, 等. 毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮对凝结水形成和蒸发的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(19): 6173-6180.  
YIN Ruiping, WU Yongsheng, ZHANG Xin, et al. Effects of biological crusts on dew deposition and evaporation in the Southern Edge of the Mu Us Sandy Land, Northern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19): 6173-6180. (in Chinese with English abstract)
- [28] 陈晓涵, 吴永胜, 海春兴. 毛乌素沙地南缘固沙灌丛下地表凝结水特征[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(1): 83-95.  
CHEN Xiaohan, WU Yongsheng, HAI Chunxing. Effects of surface dew under different types of sand-fixing shrubs in the southern margin of Mu Us Sandy Land, Northern China[J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(1): 83-95. (in Chinese with English abstract)
- [29] 钱连红, 李洪波, 张国盛, 等. 毛乌素沙地三种下垫面土壤吸湿凝结水量的比较[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(3): 122-125.  
QIAN Lianhong, LI Hongbo, ZHANG Guoqiang, et al. Comparison of soil absorption of condensation water among three underlying surfaces in Mu Us Sandland[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(3): 122-125. (in Chinese with English abstract)
- [30] 辛静, 田永飞, 贾丽琼, 等. 毛乌素沙地的植被恢复方法浅析[J]. *中国农业信息*, 2014(19): 158.  
XIN Jing, TIAN Yongfei, JIA Liqiong, et al. Analysis of vegetation restoration methods in Mu Us Sandy Land[J]. *China Agricultural Informatics*, 2014(19): 158. (in Chinese with English abstract)
- [31] 代远萌, 李满乐, 徐铭泽, 等. 毛乌素沙地沙丘不同固定阶段黑沙蒿叶性状特征研究[J]. *植物生态学报*, 2022, 46(11): 1376-1387.  
DAI Yuanmeng, LI Manle, XU Mingze, et al. Leaf traits of *Artemisia ordosica* at different dune fixation stages in Mu Us Sandy Land[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022, 46(11): 1376-1387. (in Chinese with English abstract)
- [32] LIANG P, YANG X. Landscape spatial patterns in the Maowusu (Mu Us) Sandy Land, northern China and their impact factors[J]. *CATENA*, 2016, 145: 321-333.
- [33] 廉泓林, 韩雪莹, 刘雅莉, 等. 基于标准化降水蒸散指数(SPEI)的毛乌素沙地1981—2020年干旱特征研究[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(4): 71-80.  
LIAN Honglin, HAN Xueying, LIU Yali, et al. Study on spatiotemporal characteristics of atmospheric drought from 1981 to 2020 in the Mu Us Sandy Land of China based on

- SPEI index[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(4): 71-80. (in Chinese with English abstract)
- [34] JIA X, ZHA T, GONG J, et al. Multi-scale dynamics and environmental controls on net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange over a temperate semiarid shrubland[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 259: 250-259.
- [35] 靳川, 蒋燕, 李鑫豪, 等. 毛乌素沙地油蒿光系统 II 多时间尺度的环境响应特征[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 152-160.
- JIN Chuan, JIANG Yan, LI Xinhao, et al. Multi-time scale property of environmental responses to photosystem II of *Artemisia ordosica* in Mu Us desert[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(2): 152-160. (in Chinese with English abstract)
- [36] 南京水利科学研究院. 土的工程分类标准[M]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [37] 季辰, 朱忠礼, 徐自为. 高精度称量式蒸渗仪数据处理方法研究[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2016, 52(5): 628-634.
- JI Chen, ZHU Zhongli, XU Ziwei. Data processing of high precision weighing lysimeter[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2016, 52(5): 628-634. (in Chinese with English abstract)
- [38] ZHUANG Y, ZHAO W. Dew formation and its variation in Haloxylon ammodendron plantations at the edge of a desert oasis, northwestern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 247: 541-550.
- [39] JIA Z, MA Y, LIU P, et al. Relationship between sand dew and plant leaf dew and its significance in irrigation water supplementation in Guanzhong Basin, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78: 1-10.
- [40] 吴友杰, 杜太生. 西北干旱区农田土壤蒸发量及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 110-116.
- WU Youjie, DU Taisheng. Evaporation and its influencing factors in farmland soil in the arid region of Northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(12): 110-116. (in Chinese with English abstract)
- [41] KEINATH D A, DOAK D F, HODGES K E, et al. A global analysis of traits predicting species sensitivity to habitat fragmentation[J]. Global Ecology and Biogeography, 2017, 26(1): 115-127.
- [42] DEATH G. Boosted trees for ecological modeling and prediction[J]. Ecology, 2007, 88(1): 243-251.
- [43] 徐秋蓉, 郑新奇. 一种基于地理探测器的城镇扩展影响机理分析法[J]. 测绘学报, 2015, 44(S1): 96-101.
- XU Qiurong, ZHENG Xinqi. Analysis of influencing mechanism of urban growth using geographical detector[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(S1): 96-101. (in Chinese with English abstract)
- [44] ELITH J, LEATHWICK J R, HASTIE T. A working guide to boosted regression trees[J]. Journal of Animal Ecology, 2008, 77(4): 802-813.
- [45] HOSMER D W, LEMESHOW S. Applied logistic regression[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000.
- [46] 朱新军, 王中根, 夏军, 等. 基于分布式模拟的流域水平衡分析研究: 以海河流域为例[J]. 地理科学进展, 2008, 27(4): 23-27.
- ZHU Xinjun, WANG Zhonghen, XIA Jun, et al. Basin level water balance analysis study based on distributed hydrological mode: case study in the haihe river basin[J]. Progress in Geography, 2008, 27(4): 23-27. (in Chinese with English abstract)
- [47] ZHANG Z, WANG W, GONG C, et al. Salix psammophila afforestations can cause a decline of the water table, prevent groundwater recharge and reduce effective infiltration[J]. Science of the Total Environment, 2021, 780: 146336.
- [48] GONG C, WANG W, ZHANG Z, et al. Comparison of field methods for estimating evaporation from bare soil using lysimeters in a semi-arid area[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125334.
- [49] 陈蕾, 郭熙, 韩逸, 等. 基于 BRT 模型的南昌市城市扩展时空特征及驱动因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(2): 322-333.
- CHEN Lei, GUO Xi, HAN Yi, et al. Research on spatio-temporal characteristics and driving factors of urban expansion in Nanchang city based on BRT model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(2): 322-333. (in Chinese with English abstract)
- [50] 李玉灵, 朱帆, 张国盛, 等. 毛乌素沙地凝结水动态变化及其影响因子的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(8): 61-66.
- LI Yuling, ZHU Fan, ZHANG Guosheng, et al. Dynamics of dew condensation and its controlling factors in Mu Us desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(8): 61-66. (in Chinese with English abstract)
- [51] VUOLLEKOSKI H, VOGT M, SINCLAIR V A, et al. Estimates of global dew collection potential on artificial surfaces[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19: 601-613.
- [52] PAN Y, WANG X, ZHANG Y. Dew formation characteristics in a revegetation-stabilized desert ecosystem in Shapotou area, Northern China[J]. Journal of Hydrology Amsterdam, 2010, 387(3): 265-272.
- [53] 阎百兴, 邓伟. 三江平原露水资源研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(6): 732-737.
- YAN Baixing, DENG Wei. Study on the dew resource in Sanjiang Plain[J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(6): 732-737. (in Chinese with English abstract)
- [54] XIAO H, MEISSNER R, SEEGER J, et al. Effect of vegetation type and growth stage on dewfall, determined with high precision weighing lysimeters at a site in northern Germany[J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(1): 43-49.



## Dew formation characteristics of *Artemisia ordosica* and its influence on water balance in the Mu Us Sandy Land

RAN Bin, ZHANG Zaiyong<sup>\*</sup>, YANG Jingbo, XU Da, GONG Chengcheng

(1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Dew is one of the most important supplementary water sources in arid and semi-arid regions. The influence of dew amount on the water balance can be evaluated for water management, ecosystem protection, and the optimization of agricultural practices. Moreover, the influencing factors of dew formation can provide some insights into how climate change may impact water availability and ecosystems. However, it is still unclear in the dew formation, due to the difficulty of observation without considering the dew in the water balance. This study aims to quantify the dew amount for a better understanding of dew formation. A series of lysimeter experiments were carried out to continuously observe the dew amount in the Mu Us desert from October 2020 to September 2021. Among them, the dew amount included the fog, dew, and hoar frost formation. In addition, the meteorological factors were monitored at the experimental site, including air temperature, precipitation, wind speed, relative humidity, net radiation, and surface temperature. All data were recorded every ten minutes. The dew amount was evaluated for the water balance during formation. Boosted regression tree (BRT) model was used to investigate the influence of meteorological factors on dew formation. The results were as follows. 1) The dew amount was 47.1 mm in the experimental period, corresponding to 19.6% of the annual rainfall. The dew started to form at night when the air temperature was significantly higher than the soil surface temperature. The dew was mainly formed from October 2020 to January 2021 (cold months), with a maximum amount of 9.00 mm in December 2020, and a minimum of 0.55 mm in June 2021. The dew amount was larger in the colder months than that in the warmer ones. 2) The BRT model showed that the largest contribution (43.4%) was found in the relative humidity to the dew formation. It infers that relative humidity was a key factor in the formation of dew. The contribution rates of the net radiation at night and the wind speed to the dew formation were 21.7% and 15.2%, respectively. The much fewer contributions to the dew formation were the air temperature and vapor pressure deficit. The optimal combination of parameters was achieved in the dew formation, such as the relative humidity greater than 53%, net radiation at night less than  $-37 \text{ W/m}^2$ , and wind speeds ranging from 0.5 to 1.8 m/s. 3) The surrounding air temperature and relative humidity of *Artemisia ordosica* posed the more significant influence on the dew formation, compared with bare ground. The errors of the water balance were reduced from 25.3% to 5.7%, considering the amount of dew in the semi-arid regions. The dew amount was quantified to improve the accuracy of the water balance. The finding can provide a strong reference to accurately evaluate the water resources and then better understand the formation process of dew amounts under the coverage of *Artemisia ordosica*. In addition, the *Artemisia ordosica* in the water cycle can be expected to protect the vegetation ecosystems in the arid and semi-arid regions.

**Keywords:** humidity; temperature; dew; *Artemisia ordosica*; boosted regression tree; water balance; Mu Us Sandy Land