



# 基于茎流-蒸渗仪法的荒漠草原带人工灌丛群落蒸散特征

马龙龙 杜灵通\* 丹 杨 王 乐 乔成龙 吴宏玥

宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 银川 750021; 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

**摘 要** 中国西北地区通过大量种植中间锦鸡儿(*Caragana liouana*)进行生态治理, 在荒漠草原带上形成人工灌丛景观, 改变了生态系统的结构和功能, 影响到地-气水汽循环过程, 研究该人工灌丛群落的蒸散特征, 对揭示其生态水文效应和指导地方生态治理实践具有重要意义。该文以宁夏盐池荒漠草原带上的人工灌丛群落为例, 利用茎流-蒸渗仪法测定了2018年5–8月的灌木蒸腾和丛下蒸散, 并分析了环境因子对人工灌丛群落蒸散的影响。结果表明: (1)茎流-蒸渗仪法所测的群落蒸散与水量平衡法、涡度相关法得到的群落蒸散有较好的一致性, 茎流-蒸渗仪法能适用于荒漠草原带人工灌丛群落蒸散及其组分结构的测定; (2)观测期内晴天的灌木蒸腾速率和丛下蒸散速率日变化趋势相近, 均为单峰曲线, 群落蒸散主要发生在日间, 但灌丛最大蒸腾速率的出现时间比丛下蒸散最大速率的出现时间晚1 h; (3)5–8月间灌木累积蒸腾为83.6 mm, 日平均蒸腾量为 $0.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 季节变化呈抛物线状; 同期丛下累积蒸散为182.5 mm, 日平均蒸散量为 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ; 丛下蒸散明显大于灌木蒸腾; (4)观测期间人工灌丛群落累积蒸散266.1 mm, 而同期的降水量为222.6 mm, 陆面水分收支处于亏缺状态; (5)净辐射是影响蒸散最主要、最直接的驱动因素, 且能够影响其他因子进而对人工灌丛群落蒸散产生作用。综上, 人工灌丛引发荒漠草原地带陆面水分收支亏缺的现象, 在生态恢复与重建中须引起注意。

**关键词** 荒漠草原带; 人工灌丛; 蒸腾; 水循环; 中间锦鸡儿

马龙龙, 杜灵通, 丹杨, 王乐, 乔成龙, 吴宏玥 (2020). 基于茎流-蒸渗仪法的荒漠草原带人工灌丛群落蒸散特征. 植物生态学报, 44, 807–818. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0104

## Characteristics of evapotranspiration in planted shrub communities in desert steppe zone based on sap flow and lysimeter methods

MA Long-Long, DU Ling-Tong\*, DAN Yang, WANG Le, QIAO Cheng-Long, and WU Hong-Yue

Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; and Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

### Abstract

**Aims** *Caragana liouana* has been widely planted in northwest China for ecological restoration which has induced the planted shrub landscape in the desert steppe zone and changed the structure and function of the original ecosystem. These plantations would affect the water vapor interactions between land surface and atmosphere eventually. Therefore, studying the evapotranspiration characteristics of the planted shrub communities in the desert steppe zone is significant for us to understand its ecohydrological mechanism and guide local ecological restoration.

**Methods** The transpiration of shrubs and the evapotranspiration under shrub canopy in the desert steppe zone in Yanchi County, Ningxia, were measured by a coupled method of sap flow sensors and lysimeter from May to August in 2018. The effects of environmental factors on the evapotranspiration of the planted shrub communities were analyzed by path analysis.

**Important findings** (1) The evapotranspiration obtained by the coupled method of sap flow sensors and lysimeter was consistent with the estimations based on the water balance method and the eddy covariance method.

收稿日期Received: 2020-04-15 接受日期Accepted: 2020-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(41967027和41661003)、宁夏优秀人才支持计划(RQ0012)、中国科学院“西部之光”人才培养引进计划(XAB2017AW01)和宁夏高等学校一流学科建设(生态学)项目(NXYLXK2017B06)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41967027 and 41661003), the Ningxia Excellent Talents Support Program (RQ0012), the “Light of West China” Program of Chinese Academy of Sciences (XAB2017AW01), and the Project of First-Class Discipline Construction (Ecology) for Ningxia Higher Education (NXYLXK2017B06).

\* 通信作者Corresponding author (dult80@qq.com)

Thus, the coupled method of sap flow and lysimeter can be used to measure the evapotranspiration and its components of the planted shrub communities in the desert steppe zone. (2) The diurnal variations of transpiration rate of shrubs and the evapotranspiration rate under shrub canopy were consistent with each other, and both presented an obvious single peak at noon. The evapotranspiration of the planted shrub communities mainly occurred in day time. However, the time of the maximum transpiration rate of shrubs was 1 h later than that of the maximum evapotranspiration rate under shrub canopy. (3) The cumulative transpiration of shrubs was 83.6 mm, the daily average transpiration was  $0.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ , and the series curve of daily transpiration had a parabolic shape from May to August. The cumulative evapotranspiration under shrub canopy was 182.5 mm, and the daily average evapotranspiration was  $1.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  during the same period. The evapotranspiration under shrub canopy was higher than the transpiration of shrubs. It can be concluded that the water consumption in the planted shrub communities is mainly caused by evapotranspiration under shrub canopy. (4) The total evapotranspiration of the planted shrub communities from May to August was 266.1 mm, and the total precipitation in the same period was 222.6 mm. Therefore, the water balance in the planted shrub communities was in deficit. (5) Net radiation is the most important and direct driving factor that affected evapotranspiration of the planted shrub communities, and it coupled other environmental factors to drive the process of evapotranspiration. Therefore, the water deficit in the planted shrub communities encroaching desert steppe zone should be paid attention in ecological restoration and reconstruction.

**Key words** desert steppe zone; planted shrubs community; transpiration; water cycle; *Caragana liouana*

Ma LL, Du LT, Dan Y, Wang L, Qiao CL, Wu HY (2020). Characteristics of evapotranspiration in planted shrub communities in desert steppe zone based on sap flow and lysimeter methods. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 807–818. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0104

蒸散(ET)包括植物叶片蒸腾(T)及来自土壤、水体和植物表面的蒸发(E), 是土壤-植被-大气间水分收支和能量交换的主要途径(Katul *et al.*, 2012; Wang & Dickinson, 2012), 也是联系植物气孔行为、水分利用和碳交换等关键生态过程的纽带(Mu *et al.*, 2007), 对维持生态系统的稳定性具有重要意义。每年全球陆地生态系统有59%的降水通过蒸散返回大气, 其中草地生态系统达到了67.7% (Oki & Kanae, 2006), 在干旱区更高(李琴等, 2012), 可见蒸散对于干旱区草地水文循环的重要作用。近年有关“地球变绿”的话题引起广泛关注, 其中一个主要贡献是中国的植树造林(Chen *et al.*, 2019), 包括西北荒漠草原带的生态治理, 但这一现象的碳水循环反馈机制尚需研究(Piao *et al.*, 2020)。宁夏盐池县在20世纪末实施了系列生态治理工程, 大量种植中间锦鸡儿(*Caragana liouana*)防沙治沙和改善生态, 逐渐在荒漠草原上形成了约 $8.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的人工灌丛景观(郑琪琪, 2019), 改变了土地利用方式和植被类型结构(宋乃平等, 2015)。已有研究表明, 植被盖度增加会增强生态系统蒸散(Zhang *et al.*, 2015); 同时, 人工灌丛形成过程中的草本向灌木植被类型转变, 会改变生态系统的蒸发/蒸腾比例(Schlesinger & Jasechko, 2014), 也会导致土壤水分消耗加速和空间异质性

加剧(李新荣等, 2014; 赵亚楠等, 2018); 且人工灌丛的稳定性和持续性仍不确定(刘可, 2018)。因此, 研究人工植被重建背景下荒漠草原带人工灌丛群落蒸散特征, 探讨其水分供需关系及耗水规律, 对指导当地生态可持续治理具有重要意义。

近年来, 基于不同时空尺度的蒸腾及蒸散研究方法不断改进, 主要有气孔计法、茎流法、蒸渗仪法、涡度相关法、波文比法、遥感和模型估算等(Seneviratne *et al.*, 2010; 宋璐璐等, 2012)。祁秀娇等(2019)基于茎流法和涡度相关法测定了科尔沁沙地小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)群落的蒸散; 张志山等(2005)利用微型蒸渗仪和便携式光合仪研究了沙坡头柠条(*Caragana korshinskii*)蒸腾与蒸散耗水特征; 由于受土壤蒸发和灌丛、草本蒸腾难以拆分的限制, 荒漠草原带人工灌丛群落的蒸散特征研究较少, 特别是人工种植灌木后的蒸散组分变化及生态水文过程机理尚理解不够。茎流法被广泛应用于木本植被蒸腾耗水的研究(岳广阳等, 2006, 2007, 2009), 微型蒸渗仪是测量土壤蒸发和草本层蒸腾的最普遍、最直接的方法(张志山等, 2005; 鲍忠文等, 2013), 屈艳萍等(2014)结合茎流计和微型蒸渗仪的优势, 研究新疆杨(*Populus alba* var. *pyramidalis*)的蒸腾和土壤蒸发特性; 人工灌丛群落由木本和草

本物种共同组成(柴永福等, 2019), 可见, 测定其群落蒸散及其组分最为有效的方法便是茎流法和蒸渗仪的组合。因此, 本研究以宁夏盐池县荒漠草原带中间锦鸡儿为优势种的人工灌丛群落为例, 基于茎流-蒸渗仪法测定灌木蒸腾和丛下蒸散, 并分析蒸散与环境因子间的关系, 旨在阐明荒漠草原带人工灌丛的蒸散特征, 揭示其耗水规律, 为区域生态治理提供理论指导。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验区概况

宁夏盐池县北邻毛乌素沙地, 东南与黄土高原相连, 地势南高北低; 属典型的温带大陆性气候, 1958–2017年的年平均气温为8.3 °C, 年降水量为297 mm, 降水集中在7–9月, 年际变化率较大, 年蒸发量2 136 mm; 地带性土壤以灰钙土为主, 非地带性土壤主要有风沙土和草甸土等, 土壤结构松散; 植被类型以灌丛、草原和沙生植被为主(方楷等, 2011), 分布有大面积的荒漠草原。试验在盐池县花马池镇杨寨子自然村的宁夏大学荒漠草原生态系统定位研究站(107.33° E, 37.83° N)开展, 杨寨子村从1988年开始在荒漠草原上种植中间锦鸡儿灌木来治理草原退化, 一直持续到21世纪初。样地选择1996年种植的中间锦鸡儿灌木林, 围栏封育, 未平茬处理, 是盐池荒漠草原带上生态治理形成的典型人工灌丛群落。试验样地在低矮梁地的缓坡上, 地形较为平坦, 面积广阔, 中间锦鸡儿呈带状分布, 种植行距6–8 m, 丛距1 m, 平均株高1.4 m, 为减少人畜

干扰, 样地设置了30 m × 20 m的围栏。地被层稀疏分布有短花针茅(*Stipa breviflora*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、白草(*pennisetum centrasianicum*)、赖草(*Leymus secalinus*)、老瓜头(*Cynanchum komarovii*)和地锦草(*Euphorbia humifusa*)等(杨新国等, 2015; 赵伟等, 2015), 由于中间锦鸡儿对养分水分的竞争, 荒漠草原的原生植物发生退化, 灌木和地被层植物形成了两个明显的层片结构。样地土壤为风沙土, 5–10月土壤有效储水量呈负值, 并随降水量的增加而增加(卞莹莹等, 2015), 由于长期灌木固沙和封育等措施, 部分土壤表层开始形成结皮。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 试验设计

由于盐池荒漠草原带人工灌丛群落有两个明显的层片结构, 其样地群落尺度的蒸散可分割为灌木蒸腾和丛下蒸散(含土壤蒸发和地被层植物蒸腾)两个组分, 为科学合理测定样地群落尺度的蒸散及组分来源, 本研究设计了茎流+蒸渗仪的人工灌丛群落蒸散观测体系(图1), 其中包裹式茎流仪测定上层片的灌木蒸腾, 蒸渗仪测定下层片的地被层植物蒸腾及土壤蒸发。由于样地各物种的共同生长季在4月中旬至9月下旬, 为顾及各蒸散水分来源的一致性, 对2018年5–8月期间的人工灌丛群落蒸散进行了观测。由于中间锦鸡儿簇状丛生和多分枝的生物学特性, 观测其蒸腾的难度较大, 只能按照一定的抽样规则从样地茎枝中选出一部分个体进行茎流观测, 再将枝干尺度的茎流扩展到样地尺度的灌木蒸

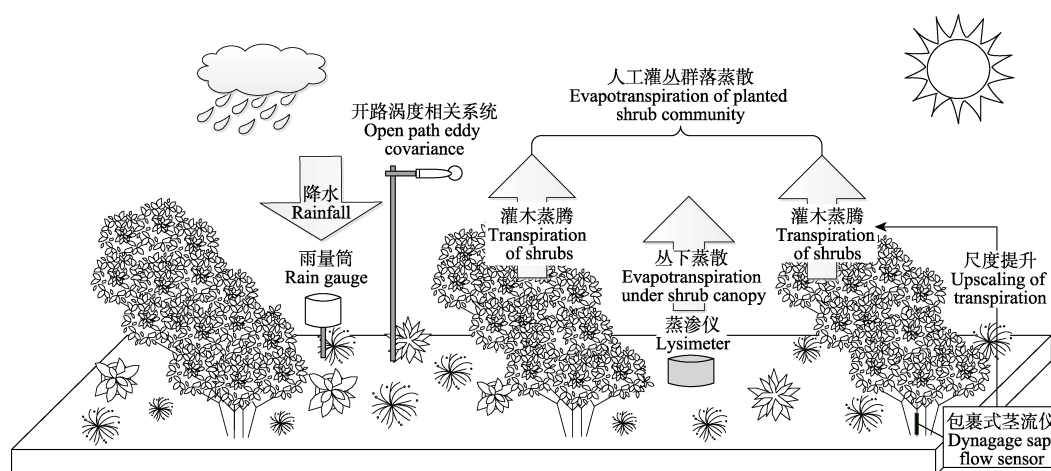


图1 人工灌丛群落蒸散观测示意图。

Fig. 1 Evapotranspiration of a planted shrub community and its measurement.

腾(见1.2.2)。为此, 2018年4月19日在样地中设置20 m × 20 m的样方, 采用3种株型加3种枝型的分层抽样法对中间锦鸡儿进行生物学形态特性调查(郑琪琪, 2019), 样地内中间锦鸡儿按冠幅直径可划分大株(>2 m) 8株、中株(1–2 m) 9株和小株(<1 m) 10株, 每株平均34个茎枝, 小、中、大3种枝型的平均枝径为0.548、0.920和1.620 cm。茎流仪测量的是被包裹茎枝的蒸腾, 在枝干尺度上, 茎枝蒸腾强弱与枝型(枝径大小和枝端叶片数量)密切相关, 而与株型关系不大。因此, 根据3种枝型特征和包裹式茎流仪(Flow 32-1K, Dynamax, Houston, USA)可提供的探头型号, 在每种枝型中各选择2枝径粗接近平均枝径、通直圆满、叶片分布适中、具有代表性的茎枝进行观测, 传感器规格及茎枝基本特征见表1。利用数据采集器(CR1000, CSI, Logan, USA)将中间锦鸡儿茎流引起的传感器电流变化信号以5 min为间隔进行采集并存储, 之后利用Dynamax公司提供的算法, 结合茎枝参数进行茎流速率计算。在中间锦鸡儿灌丛行带间1/2处取原位土柱, 安置直径300 mm、深150 mm的微型蒸渗仪, 数据采集时间为30 min, 测量精度为0.07 mm, 用于测定丛下蒸散。

表1 茎流传感器探头型号及对应茎枝参数

Table 1 Stem flow sensor types and corresponding parameters of measured stem

| 植物类型<br>Plant type               | 茎枝编号<br>Stem number | 探头型号<br>Sensor model | 枝径<br>Diameter of stem (cm) | 茎枝截面积<br>Horizontal area (cm <sup>2</sup> ) |
|----------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|
| 中间锦鸡儿<br><i>Caragana liouana</i> | 枝-1 Stem-1          | SGA5-WS              | 0.502                       | 0.198                                       |
|                                  | 枝-2 Stem-2          | SGA5-WS              | 0.521                       | 0.213                                       |
|                                  | 枝-3 Stem-3          | SGB9-WS              | 1.124                       | 0.990                                       |
|                                  | 枝-4 Stem-4          | SGB9-WS              | 1.010                       | 0.801                                       |
|                                  | 枝-5 Stem-5          | SGB16-WS             | 1.680                       | 2.217                                       |
|                                  | 枝-6 Stem-6          | SGB16-WS             | 1.640                       | 2.112                                       |

## 1.2.2 茎流-蒸渗仪法的人工灌丛群落蒸散测定

**1.2.2.1 茎流向灌木蒸腾转换** 由于中间锦鸡儿簇状丛生和多分枝的生物学特性, 有限茎枝的茎流测试无法真实反映样地群落水平上的灌木蒸腾。而近年来发展出的以枝径横截面积为扩展基础的尺度提升方法(Ji *et al.*, 2016; 段利民等, 2018), 可将中间锦鸡儿的茎流观测转换为样地群落的灌木蒸腾, 公式如下:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n (A_p / A_i) \times [(1000 \times F_i) / (\rho \times A_i)]}{n} \quad (1)$$

式中,  $A_p$ 为样方内枝径横截面积总和(m<sup>2</sup>);  $A_i$ 为安装

茎流计的茎枝*i*的枝径横截面(m<sup>2</sup>);  $A_1$ 为样方面积(m<sup>2</sup>);  $F_i$ 为茎枝*i*的茎流量(kg·d<sup>-1</sup>);  $\rho$ 为水的密度(kg·m<sup>-3</sup>);  $n$ 为标准茎枝的数量。

**1.2.2.2 丛下蒸散测定** 微型蒸渗仪测定人工灌丛群落下层片的草本植物蒸腾和土壤蒸发, 由于试验区降水量少, 加之地形平坦, 砂质土壤, 一般不产生径流, 故不考虑地表径流的影响, 根据水量平衡原理, 丛下蒸散计算公式如下(王伟娜等, 2019):

$$ET_{\text{under}} = \Delta S + P - Q \quad (2)$$

式中,  $ET_{\text{under}}$ 为丛下蒸散;  $\Delta S$ 为蒸渗仪内储水量变化;  $P$ 为降水量;  $Q$ 为渗漏量。

**1.2.2.3 人工灌丛群落蒸散计算** 荒漠草原带人工灌丛群落蒸散由灌木蒸腾和丛下蒸散组成(图1), 公式如下:

$$ET = T + ET_{\text{under}} \quad (3)$$

式中,  $ET$ 为人工灌丛群落蒸散;  $ET_{\text{under}}$ 为微型蒸渗仪测定的丛下蒸散;  $T$ 为灌木蒸腾。

## 1.2.3 蒸散精度验证方法

**1.2.3.1 试验期间群落蒸散总量验证方法** 利用水量平衡法计算2018年5–8月间样地的群落蒸散总量, 并与茎流-蒸渗仪法所测的群落蒸散总量对比, 计算绝对误差和相对误差两个指标进行验证。水量平衡法根据样地区域内水量的收入和支出差额来间接推算群落蒸散总量, 公式如下(屈艳萍等, 2014):

$$ET = I + P + W - D - \Delta W \quad (4)$$

$$\Delta W = (t_0 - t_1) \times h \quad (5)$$

式中,  $ET$ 为时段 $t_0$ 至 $t_1$ 内的群落蒸散总量(mm);  $P$ 为降水量(mm);  $I$ 为灌水量, 本试验样地无人工灌溉;  $W$ 是地下水补给量;  $D$ 为深层渗漏量; 由于样地所在缓坡丘陵梁地的地下水位埋深超过6 m (朱林等, 2014), 故忽略 $W$ 和 $D$ ;  $\Delta W$ 为时段 $t_0$ 至 $t_1$ 内土壤含水量的变化(mm);  $t_0$ 、 $t_1$ 分别为时段初、末的体积含水量(%);  $h$ 为水量平衡计算深度。

**1.2.3.2 群落日蒸散精度验证方法** 以开路涡度相关系统观测的样地群落日蒸散为基础, 利用平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)两个指标, 对茎流-蒸渗仪法获取的群落日蒸散进行精度验证。涡度相关是直接测定大气与植物群落气体交换通量(包括蒸散)的通用方法(Wilson *et al.*, 2002), 本样地的开路式涡度相关系统安装在气体通量主风向源区上空, 由红外气体分析仪(LI-7500A, LI-COR, Lincoln, USA)和三维超声风速仪(WindMaster Pro, Gill,

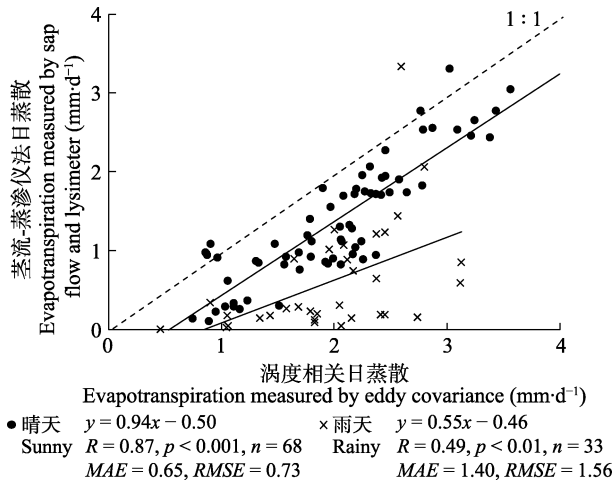


图2 茎流-微型蒸渗仪法与涡度相关法所测日蒸散对比。  
Fig. 2 Comparison of daily evapotranspiration measured by sap flow-lysimeter method and eddy covariance method.

Lymington, UK)组成, 架设高度为3 m, 数据采样频率为10 Hz。利用EddyPro软件对原始数据进行异常剔除、坐标旋转和空气密度效应(WPL)订正等处理(刘晨峰等, 2009), 获得人工灌丛样地群落尺度的日蒸散。

#### 1.2.4 影响蒸散的环境因子分析方法

**1.2.4.1 环境因子测定** 安装在2 m高度的气象站(Vantage Pro 2, DAVIS, Lawrenceville, USA)获取同期气温、风速等气象要素, 观测时间间隔为1 h; 用自动雨量筒(TE525MM-L, Texas Electronics, Dallas, USA), 空气温湿度传感器(HMP45C, CSI, Logan, USA), 辐射传感器(CNR-4, Kipp & zonen, Delft, Netherlands), 土壤湿度传感器(SM150, Delta-T, Cambridge, UK), 土壤温度传感器(107-L, CSI, Logan, USA)采集样地的降水量、空气温度、空气相对湿度、太阳辐射、土壤体积含水量和土壤温度等气象环境要素, 传感器信号由数据采集器(CR1000, CSI, Logan, USA)记录, 数据采集间隔为5 min。

**1.2.4.2 通径分析** 通径分析是通过将自变量与因变量之间的相关系数分解为直接作用和间接作用, 来研究变量间的相互关系以及自变量对因变量的作

用方式与程度(蔡甲冰等, 2011), 不受自变量间度量单位和变异程度的影响(许婧璟等, 2018), 因此本文利用通径分析法确定环境因子对人工灌丛群落蒸散的影响程度。

## 2 结果和分析

### 2.1 茎流-蒸渗仪法测定蒸散的精度验证

茎流-蒸渗仪法测得2018年5–8月人工灌丛群落的蒸散总量为266.1 mm, 而水量平衡法测得的群落蒸散总量为298.2 mm, 茎流-蒸渗仪法测得的蒸散低于水量平衡法测得的蒸散总量, 两者的绝对误差为32.1 mm, 相对误差为10.8% (表2), 总体来说, 茎流-蒸渗仪法与水量平衡法计算结果具有较好的一致性, 说明茎流-蒸渗仪法能够适用于荒漠草原带人工灌丛群落蒸散总量的测定。

利用5月1日到8月9日涡度相关系统观测的日蒸散数据(10日后仪器故障), 对茎流-蒸渗仪法日蒸散进行精度验证(图2)。晴天条件下, 茎流-蒸渗仪日蒸散与涡度相关日蒸散显著相关( $p < 0.001$ ), 茎流-蒸渗仪所测的日蒸散的MAE为0.65 mm·d<sup>-1</sup>, RMSE为0.73 mm·d<sup>-1</sup>, 且靠近1:1线, 这表明该方法所测日蒸散精度较高。雨天条件下, 尽管两种蒸散也显著相关( $p < 0.01$ ), 但MAE和RMSE较大, 由于空气水汽湍流复杂, 雨水滴落或浸湿红外气体分析仪探头, 会造成涡度相关系统的蒸散观测误差较大(刘晨峰等, 2009), 大多数研究中将雨天涡度数据剔除(Soubie *et al.*, 2016), 这可能是导致雨天日蒸散精度验证效果不理想的原因。

### 2.2 灌木蒸腾和丛下蒸散的日内动态

选取2018年5–8月所有晴天条件下的灌木蒸腾速率和丛下蒸散速率数据, 并计算日内0.5 h间隔的平均值, 绘制出荒漠草原带人工灌丛群落的灌木蒸腾与丛下蒸散日变化曲线(图3A、3B)。可以看出, 灌木蒸腾和丛下蒸散日变化特征接近, 都呈单峰曲线。灌木蒸腾速率在夜间接近0 mm·h<sup>-1</sup>, 日出后开

表2 茎流-蒸渗仪法和水量平衡法测定的人工灌丛群落5–8月蒸散总量对比

Table 2 Comparison of total evapotranspiration of a planted shrub communities measured by sap flow-lysimeter method and by water balance method from May to August

| 茎流-蒸渗仪 Sap flow-lysimeter method (mm) |                                |                                  | 水量平衡法 Water balance method (mm) |                       |                                  | 绝对误差<br>Absolute error<br>(mm) | 相对误差<br>Relative error<br>(%) |
|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 丛下蒸散<br>ET under shrub<br>canopy      | 灌木蒸腾<br>Transpiration of shrub | 群落蒸散<br>Total ET of<br>community | 降水<br>Precipitation             | 土壤含水量变化<br>$\Delta W$ | 群落蒸散<br>Total ET of<br>community |                                |                               |
| 182.5                                 | 83.6                           | 266.1                            | 222.6                           | 75.6                  | 298.2                            | 32.1                           | 10.8                          |

ET, evapotranspiration;  $\Delta W$ , change of soil water content.



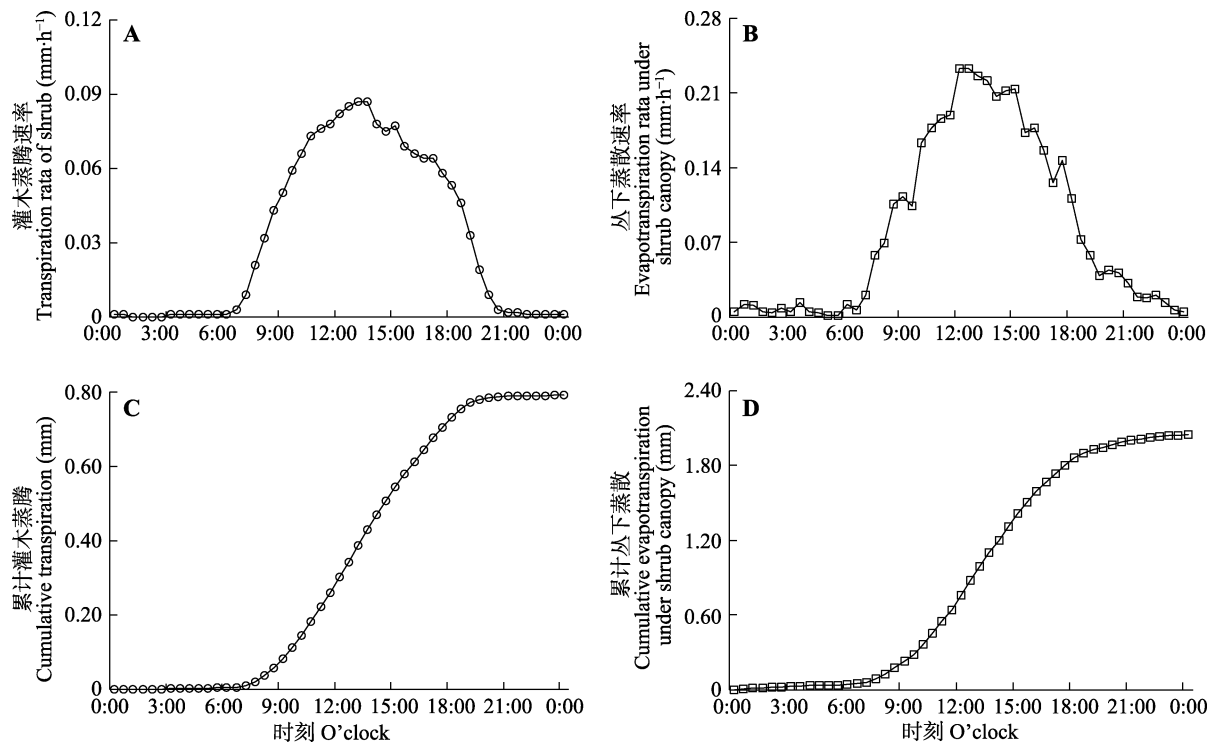


图3 灌木蒸腾和丛下蒸散的日内变化。

Fig. 3 Diurnal transpiration of shrubs and evapotranspiration under shrub canopy.

始快速增长,随着太阳辐射强度增强,在06:30–10:30间增速最快。13:30灌木蒸腾速率达到顶峰( $0.1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ),午后随着太阳辐射强度逐渐减弱,灌木蒸腾速率也缓慢下降,在17:00以后开始快速下降,20:30以后基本完全停止。灌木蒸腾速率的日变化曲线形态较为光滑,其中10:30–17:00间为日内蒸腾速率较高且较为稳定的时段,但在午后13:30–14:00间有明显的下降,可能与午间植物气孔关闭有关。

相比之下,丛下蒸散速率的日变化曲线形态较为粗糙,一方面与蒸渗仪的测量精度较低有关,同时,丛下蒸散对环境要素的短时波动敏感,特别是降水事件结束后的初晴日,因土壤蒸发量较大,导致丛下蒸散常出现快速升高,导致日变化曲线出现一些阶梯跳跃现象。丛下蒸散速率在06:30后开始快速增加,在12:00达到最大值( $0.2 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ),午间持续3 h的高蒸散速率后,从15:00开始逐渐下降,在19:30降低到低谷,开始缓慢变化,直到凌晨左右接近于 $0 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,在00:00–06:30间,丛下蒸散速率最低。

灌木蒸腾最大速率的出现时间比丛下蒸散最大速率的出现时间晚约1 h,同时灌木蒸腾的单峰曲线形态在高值区更宽阔,而丛下蒸散则具有较尖的顶峰,这是因为灌丛植被蒸腾和丛下蒸散的驱动过程不同。丛下蒸散主要由土壤蒸发构成,在午间太阳

辐射达到最大时,土壤蒸发最强,也导致丛下蒸散最高;灌木蒸腾受植物生理活动控制,水分交换响应缓慢,与丛下蒸散相比有一定的滞后性。从累积曲线来看,灌木蒸腾和丛下蒸散主要发生在日间,夜间均很微弱(图3C、3D),以盐池夏季5–8月的平均日出时间06:00和日落时间20:00来累加,灌木蒸腾在日间的平均累计量为 $0.8 \text{ mm}$ ,占单日总量的98.8%,丛下蒸散在日间的平均累计量为 $1.9 \text{ mm}$ ,占单日总量的94.2%。

### 2.3 灌木蒸腾和丛下蒸散的季节变化

将 $0.5 \text{ h}$ 尺度的灌木蒸腾和丛下蒸散数据以日尺度进行累加计算,绘制出二者在5–8月的季节变化曲线(图4A、4B)。灌木蒸腾在5–8月耗水 $83.6 \text{ mm}$ ,单日灌木蒸腾在 $0.0\text{--}2.0 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间,平均为 $0.7 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。随着天气阴晴状态不同,灌木蒸腾变化较大,在5–8月呈抛物线状,6和7月的日平均蒸腾为 $0.8 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ,高于5和8月的日平均值。同期的丛下蒸散为 $182.5 \text{ mm}$ ,单日丛下蒸散在 $0.0\text{--}6.2 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ,平均为 $1.5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。5–8月的丛下蒸散明显高于灌木蒸腾,可见荒漠草原带人工灌丛群落的水分消耗依然主要由丛下蒸散引起。

不管灌木蒸腾还是丛下蒸散,均明显受控于水分供应。人工灌丛的水分供应主要来自降水,在每

次降水事件之后土壤水分明显增加(图4C、4D), 灌木蒸腾和丛下蒸散均跟随土壤水分供应增加而突然升高(图4A、4B), 但灌木蒸腾对水分供应变化的响应明显滞后于丛下蒸散。如5月21日发生一次25.3 mm的强降水, 次日丛下蒸散便达到了6.2 mm, 但灌木蒸腾从次日开始逐渐增强, 直到5月30日达到1.9 mm的蒸腾最高峰(其中26日有次2.3 mm的弱降水事件)。降水事件之后, 随着人工灌丛群落的植被蒸腾和土壤蒸发的耗水, 土壤水分含量持续下降, 直至7%–10%的最低位。由于灌木蒸腾和丛下蒸散的驱

动能来自太阳辐射, 在阴雨天辐射微弱, 灌木蒸腾和丛下蒸散均下降至最低位。

## 2.4 观测期蒸散耗水及水分收支特征

在5–8月(含灌木和草本的共同生长季), 月平均灌木蒸腾为20.9 mm, 月平均丛下蒸散为45.6 mm, 丛下蒸散是人工灌丛群落的主要水分消耗方式, 约占总耗水的68.6%。从月尺度来看, 灌木蒸腾在6月达到最大, 为25.8 mm; 丛下蒸散在7月达到最大, 为55.7 mm; 随着丛下蒸散达到最大, 人工灌丛的群落蒸散也达到78.2 mm的年内最高(图5A)。从整个

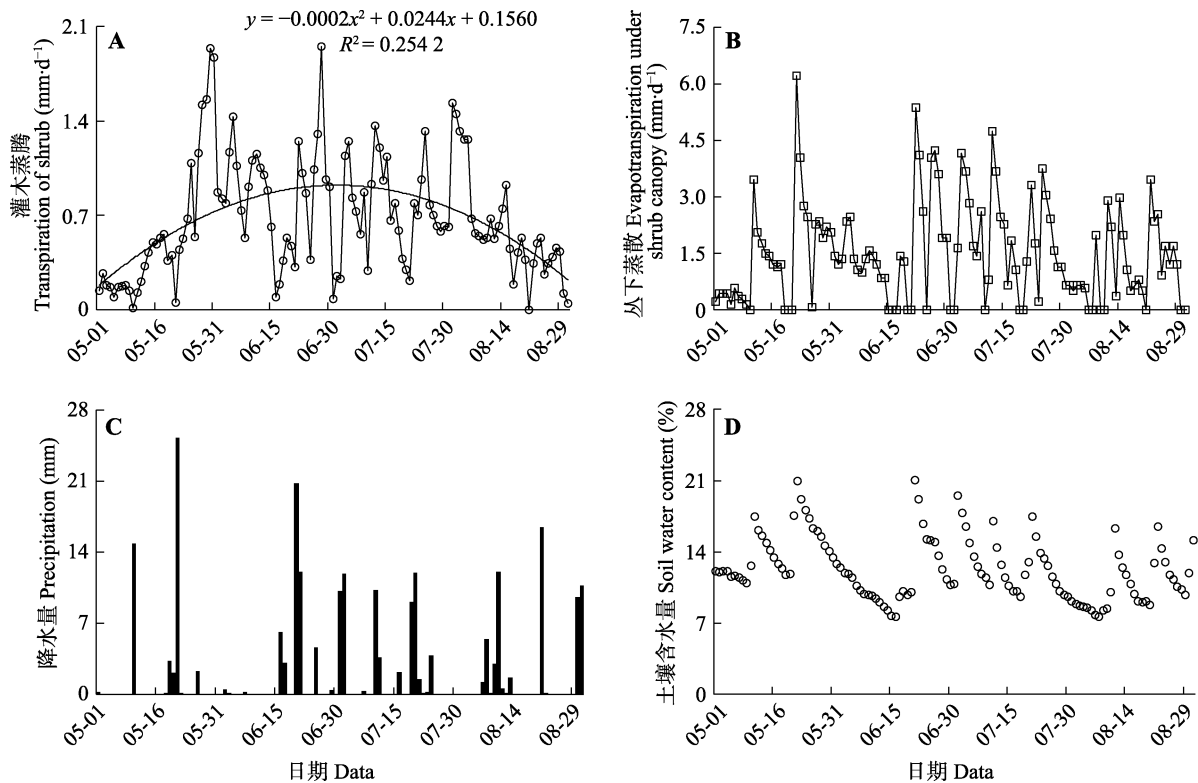


图4 灌木蒸腾、丛下蒸散与同期降水量、土壤含水量的季节动态。

Fig. 4 Seasonal variation of transpiration of shrubs, evapotranspiration under shrub canopy, precipitation and soil water content.

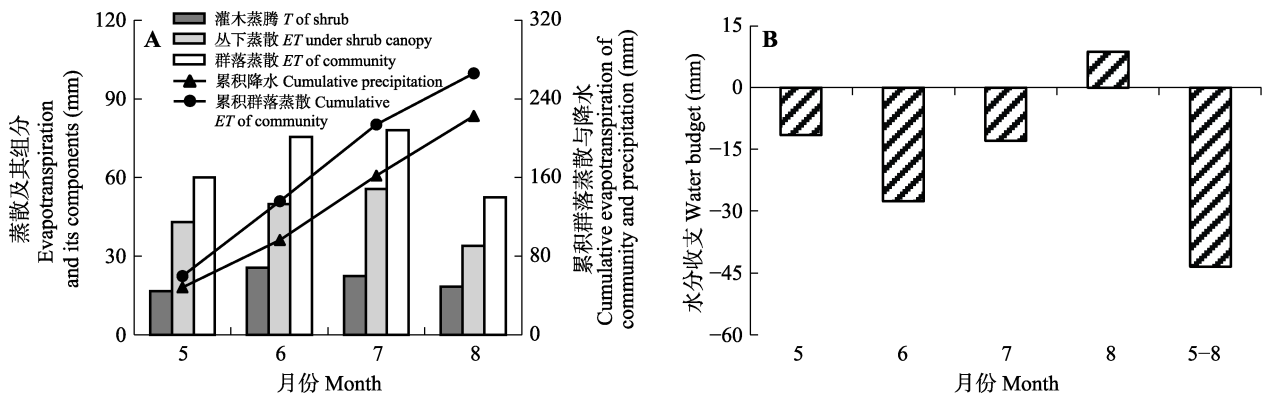


图5 观测期蒸散耗水和水分支支。

Fig. 5 Evapotranspiration and water budget of the planted shrub communities in the observation period. ET, evapotranspiration; T, transpiration.

观测期来看, 人工灌丛总蒸散为266.1 mm, 而同期的总降水量为222.6 mm, 出现43.5 mm的水分收支亏缺。但是不同月份的水分收支特征不同, 其中水分收支亏缺最严重的是6月份, 达到27.7 mm; 5和7月份水分收支亏缺相对较低, 分别为11.5和13.0 mm, 而随着盐池年内丰水季的到来和各物种生长季中后期耗水的减少, 人工灌丛群落在8月出现了8.6 mm的水分收支盈余(图5B)。

2.5 环境因子对蒸散的影响

利用通径分析法研究了气象、土壤等环境因子对人工灌丛群落蒸散的影响。由表3中的直接通径系数可以看出, 对蒸散直接影响最大的是净辐射, 通径系数为0.619; 土壤含水量、风速、气温和空气相对湿度对蒸散的直接通径系数分别为0.312、-0.253、0.163和0.188, 对蒸散的影响依次减弱; 其中风速的通径系数为负值, 为负向直接作用, 其他因子均为正向直接作用。由各因子的间接通径系数可知, 土壤含水量与蒸散的间接通径系数总和为0.145, 其贡献主要来自土壤含水量与净辐射的间接通径系数(0.141), 说明净辐射通过间接影响土壤含水量进而对蒸散产生影响; 而空气相对湿度与蒸散的间接通径系数总和为-0.217, 其贡献也主要来自空气相对湿度与净辐射的间接通径系数-0.225, 这一结果得出净辐射通过间接影响空气相对湿度进而对蒸散产生负向影响。直接通径系数和间接通径系数的综合分析表明, 净辐射是驱动人工灌丛群落蒸散的最主要因素, 且能够通过间接作用影响其他环境因子, 进而对蒸散产生综合影响。

3 讨论

茎流-蒸渗仪法可以测量出人工灌丛的灌木蒸腾和从下蒸散(含土壤蒸发和地被层植物蒸腾), 开展群落蒸散特征研究, 但包裹式茎流仪和蒸渗仪协同观测时, 两种仪器在物理原理、测量精度和时间响应敏感性等方面存在差异, 故试验观测精度至关重要。前人对不同蒸散观测方法间的精度有一些对比分析, Mac Nish等(2000)对比了水量平衡法和茎流法测定的蒸散, 指出两种结果具有较好的一致性; 屈艳萍等(2014)得出茎流-蒸渗仪法测定的新疆杨蒸发蒸腾与水量平衡法结果间的相对误差在±15%之内。本研究的案例得出, 茎流-蒸渗仪法和水量平衡法的蒸散测定结果相对误差为10.8%; 晴天状态下的日蒸散与涡度相关观测结果一致, 总体精度较高。同时, 茎流-蒸渗仪法的优势在于能获取人工灌丛群落蒸散的组分来源, 有助于理解温性荒漠草原生态系统向人工灌丛转变过程中的水文循环变化。当然, 由于人工灌丛群落蒸散及其组分的复杂性, 今后高精度的观测试验还需加强技术攻关, 称重式蒸渗仪的时间响应灵敏度较低, 是导致从下蒸散日内曲线不光滑的原因之一, 提高蒸渗仪与包裹式茎流仪响应协同性是未来的一个技术难点。在利用茎流法进行灌木蒸腾耗水尺度提升研究时, 要在大面积的生物学调查基础之上确定合适的代表性茎枝进行测量, 不仅要考虑典型茎枝在整个灌丛群落中的代表性及大小分布(Kumagai *et al.*, 2005; Huang *et al.*, 2015), 而且要注意降水量、土壤含水量等因素的时空变异性对灌木蒸腾耗水的影响(王朗等, 2009)。

表3 蒸散与环境因子的通径分析  
Table 3 Path analysis among evapotranspiration and environmental factors

|                                 | 直接通径系数<br>Direct path coefficient | 间接通径系数(间接作用) Indirect path coefficient (Indirect effect) |                      |                  |                             |                                 |                       |
|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------|------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------|
|                                 |                                   | 总和<br>Total                                              | 净辐射<br>Net radiation | 风速<br>Wind speed | 土壤含水量<br>Soil water content | 空气相对湿度<br>Air relative humidity | 气温<br>Air temperature |
| 净辐射<br>Net radiation            | 0.619                             | 0.081                                                    | —                    | -0.003           | 0.071                       | -0.068                          | 0.081                 |
| 风速<br>Wind speed                | -0.253                            | -0.077                                                   | 0.006                | —                | -0.063                      | -0.020                          | 0.000                 |
| 土壤含水量<br>Soil water content     | 0.312                             | 0.145                                                    | 0.141                | 0.051            | —                           | 0.004                           | -0.051                |
| 空气相对湿度<br>Air relative humidity | 0.188                             | -0.217                                                   | -0.225               | 0.027            | 0.007                       | —                               | -0.026                |
| 气温<br>Air temperature           | 0.163                             | 0.180                                                    | 0.306                | 0.001            | -0.097                      | -0.030                          | —                     |



蒸散由植被蒸腾和土壤蒸发组成, 而盐池荒漠草原带人工灌丛群落中既有中间锦鸡儿灌木, 还有其他草本植物, 因此其植被蒸腾由灌木和草本两部分组成。然而, 严格拆分开土壤蒸发、灌木蒸腾和草本蒸腾的难度较大, 本研究将该人工灌丛群落蒸散分为灌木蒸腾和丛下蒸散, 其中在利用微型蒸渗仪测定丛下蒸散时, 蒸渗仪中取装原位土柱, 其口径内会生长一年生草本植物, 故所测丛下蒸散包括土壤蒸发和草本蒸腾。然而, 荒漠草原受人工种植中间锦鸡儿的影响, 在斑块和景观尺度上改变了草地生态系统的结构和功能, 使得资源分配出现斑块化和异质化(高琼和刘婷, 2015)。受有限的水资源和种间竞争的制约, 人工种植的中间锦鸡儿灌丛形成了特定的群落结构和空间分布格局(张璞进等, 2017), 导致草本植物退化严重, 仅在丛下零散稀疏分布, 5–8月间的盖度一般不超过10% (刘任涛等, 2014), 因此丛下蒸散中的草本蒸腾占比很小, 主要由土壤蒸发组成。

引起灌木蒸腾变化和差异的主要原因有植物生理生态过程和水分供应环境两方面。观测期间中间锦鸡儿灌木蒸腾的季节变化呈抛物线状特征, 这与其生理生态过程密切相关, 从5月开始, 中间锦鸡儿生出新梢, 叶片快速生长, 叶面积增大, 灌木蒸腾开始增强; 6、7月中间锦鸡儿生长旺盛, 碳累积和光合速率最快, 蒸腾耗水相对较高; 而从8月开始, 中间锦鸡儿进入生长后期, 蒸腾耗水逐渐下降(包永志等, 2019)。另外, 灌木蒸腾大小差异与水分供应环境有关。高浩等(2016)利用大型称重式蒸渗仪发现, 毛乌素沙地油蒿生长季日蒸腾平均值为 $0.83 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ; 而包永志等(2019)和段利民等(2018)得出的科尔沁沙地小叶锦鸡儿生长季日蒸腾均值分别为 $1.32$ 和 $1.28 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。本研究样地位于毛乌素沙地南缘, 得出的中间锦鸡儿灌丛日平均蒸腾( $0.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )也较接近毛乌素沙地油蒿日平均蒸腾; 与地域水分供应环境差异较大的科尔沁沙地相比, 灌丛的日平均蒸腾结果也存在差异。

降水是研究区土壤水分的主要来源, 由于降水集中分布在秋季, 通常秋季是该地区土壤水分得到补充的时期。本研究中, 2018年5、6和7月均表现出了不同程度的水分收支亏缺, 土壤储水消耗大于补充, 直到8月才出现水分收支盈余, 土壤水分得以回补, 这一结果与当地的年内降水规律相符。此外, 莫

保儒等(2013)对半干旱黄土区成熟柠条(*Caragana korshinskii*)林地土壤水分监测的结果显示, 由于柠条萌动和生长对水分的大量消耗, 6月土壤含水量达到最低, 到雨季才开始回升; 盐池柠条样地的土壤水分表现出春季返潮、夏季消耗和秋季蓄积的季节规律(赵亚楠等, 2020), 本研究与以上研究所得规律一致。由于中间锦鸡儿灌木增加了蒸腾耗水, 导致人工灌丛在5–8月间出现 $43.5 \text{ mm}$ 的水分亏缺, 比人工灌丛群落形成之前的荒漠草原生态系统更为耗水。当然, 干旱区夜间地表凝结水也会为生态系统蒸散提供一定水分来源(张强等, 2012), 未来有凝结水观测资料的情况下, 可在水分收支平衡计算时加以考虑。总之, 在干旱半干旱地区, 不合理的植被建设会引起蒸散耗水过大, 从而导致大量土壤储水被消耗, 甚至利用浅层地下水(朱林等, 2014), 如盐池县四墩子的人工苜蓿(*Medicago sativa*)草地群落, 整个生育期耗水量为 $312.6 \text{ mm}$ , 高于同期的降水量, 水分亏缺达 $101.8 \text{ mm}$ (李凤民和张振万, 1991)。由此可见, 荒漠草原地区的植被重建须以水分收支平衡为基础, 为追求景观、生物量和防沙治沙效果, 大规模建设深根灌木, 掠夺式地利用土壤储水, 存在潜在风险, 在未来的生态恢复与重建中须引起注意。

## 4 结论

宁夏盐池荒漠草原带人工灌丛群落的灌木蒸腾速率和丛下蒸散速率日变化相似, 都呈单峰曲线, 群落单日蒸散主要发生在白天。2018年5–8月丛下蒸散明显大于灌木蒸腾, 荒漠草原人工种植灌木形成灌丛群落后, 水分消耗依然主要由丛下蒸散引起, 但由于灌木的进入, 增加了上层片灌木蒸腾耗水, 导致整个人工灌丛群落的总蒸散增大, 并高于同期总降水量。5、6和7月均表现出了不同程度的水分收支亏缺, 直到8月份才出现水分收支盈余, 降水开始补给土壤储水, 这一现象在未来的生态恢复与重建中须引起重视。净辐射是影响蒸散的最主要驱动因素, 且能够通过间接作用影响其他环境因子, 进而对人工灌丛的蒸散产生综合影响。

## 参考文献

- Bao YZ, Duan LM, Liu TX, Wang GL, Tong X (2019). Simulation of evapotranspiration of *Caragana microphylla* community. *Journal of Desert Research*, 39(4), 177–186.  
[包永志, 段利民, 刘廷玺, 王冠丽, 童新 (2019). 小叶

- 锦鸡儿(*Caragana microphylla*)群落蒸散发模拟. 中国沙漠, 39(4), 177–186.]
- Bao ZW, Du HL, Shi XB, Ma WY (2013). A comparison between the rhizospheric irrigation and the drip irrigation by monitoring the soil evaporation with micro-lysimeters. *Journal of Desert Research*, 33, 160–166. [鲍忠文, 杜虎林, 史学斌, 马文艺 (2013). 用微型蒸渗仪测验根灌节水潜力的田间试验研究. 中国沙漠, 33, 160–166.]
- Bian YY, Song NP, Wang X, Xiao XP (2015). Soil water deficit under different land-use type in desert steppe. *Journal of Soil and Water Conservation*, 29, 201–206. [卞莹莹, 宋乃平, 王兴, 肖旭培 (2015). 荒漠草原区不同土地利用方式下土壤水分相对亏缺. 水土保持学报, 29, 201–206.]
- Cai JB, Xu D, Liu Y, Zhang BZ (2011). Path analysis on spatio-temporal scaling effect of crop evapotranspiration in growing seasons for winter wheat after reviving. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 27(8), 69–76. [蔡甲冰, 许迪, 刘钰, 张宝忠 (2011). 冬小麦返青后腾发量时空尺度效应的通径分析. 农业工程学报, 27(8), 69–76.]
- Chai YF, Xu JS, Liu HY, Liu QR, Zheng CY, Kang MY, Liang CZ, Wang RQ, Gao XM, Zhang F, Shi FC, Liu X, Yue M (2019). Species composition and phylogenetic structure of major shrublands in North China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 793–805. [柴永福, 许金石, 刘鸿雁, 刘全儒, 郑成洋, 康慕谊, 梁存柱, 王仁卿, 高贤明, 张峰, 石福臣, 刘晓, 岳明 (2019). 华北地区主要灌丛群落物种组成及系统发育结构特征. 植物生态学报, 43, 793–805.]
- Chen C, Park T, Wang XH, Piao SL, Xu BD, Chaturvedi RK, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu ZC, Nemani RR, Myneni RB (2019). China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2, 122–129.
- Duan LM, Tong X, Lü Y, Yan X, Liu TX, Wang XX (2018). Upscaling of the transpiration and water consumption of sand-fixing vegetation *Salix gordejewii* and *Caragana microphylla*. *Journal of Natural Resources*, 33, 52–62. [段利民, 童新, 吕扬, 闫雪, 刘廷玺, Wang Xi-xi (2018). 固沙植被黄柳、小叶锦鸡儿蒸腾耗水尺度提升研究. 自然资源学报, 33, 52–62.]
- Fang K, Song NP, An H, Wei L (2011). Quantitative classification and ordination of plant communities in a desert steppe in Yanchi County of Ningxia, Northwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 30, 2719–2725. [方楷, 宋乃平, 安慧, 魏乐 (2011). 宁夏盐池荒漠草原植被的数量分类和排序. 生态学报, 30, 2719–2725.]
- Gao H, Qin SG, Zhu LF, Fan DQ, Chen D, Yang LM (2016). Characteristics of water consumption of *Artemisia ordosica* through transpiration and its relationships with environmental factors. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 36(2), 76–81. [高浩, 秦树高, 朱林峰, 范冬庆, 陈东, 杨路明 (2016). 单株油蒿蒸腾耗水特征及其与环境因素的关系. 水土保持通报, 36(2), 76–81.]
- Gao Q, Liu T (2015). Causes and consequences of shrub encroachment in arid and semiarid region: a disputable issue. *Arid Land Geography*, 38, 1202–1212. [高琼, 刘婷 (2015). 干旱半干旱区草原灌丛化的原因及影响——争议与进展. 干旱区地理, 38, 1202–1212.]
- Huang L, Zhang Z, Li X (2015). The extrapolation of the leaf area-based transpiration of two xerophytic shrubs in a revegetated desert area in the Tengger Desert, China. *Hydrology Research*, 46, 389–399.
- Ji X, Zhao W, Kang E, Jin B, Xu S (2016). Transpiration from three dominant shrub species in a desert-oasis ecotone of arid regions of Northwestern China. *Hydrological Processes*, 30, 4841–4854.
- Katul GG, Oren R, Manzoni S, Higgins C, Parlange MB (2012). Evapotranspiration: a process driving mass transport and energy exchange in the soil-plant-atmosphere-climate system. *Reviews of Geophysics*, 50, RG3002. DOI: 10.1029/2011rg000366.
- Kumagai T, Nagasawa H, Mabuchi T, Ohsaki S, Kubota K, Kogi K, Utsumi Y, Koga S, Otsuki K (2005). Sources of error in estimating stand transpiration using allometric relationships between stem diameter and sapwood area for *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa*. *Forest Ecology and Management*, 206, 191–195.
- Li FM, Zhang ZW (1991). The study on water use of the alfalfa grassland and the *Stipa bungeana* grassland in Ningxia Yanchi. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 15, 319–329. [李凤民, 张振万 (1991). 宁夏盐池长芒草原和苜蓿人工草地水分利用研究. 植物生态学与地植物学学报, 15, 319–329.]
- Li Q, Chen X, Liu Y, Bao AM, Veroustraete F (2012). Regional evapotranspiration retrieval in arid areas. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 26(8), 108–112. [李琴, 陈曦, 刘英, 包安明, Frank Veroustraete (2012). 干旱区区域蒸散发量遥感反演研究. 干旱区资源与环境, 26(8), 108–112.]
- Li XR, Zhang ZS, Tan HJ, Gao YH, Liu LC, Wang XP (2014). Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazard areas of northern China: relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert. *Science in China (Life Science)*, 44, 257–266. [李新荣, 张志山, 谭会娟, 高艳红, 刘立超, 王新平 (2014). 我国北方风沙危害区生态重建与恢复: 腾格里沙漠土壤水分与植被承载力的探讨. 中国科学(生命科学), 44, 257–266.]
- Liu CF, Zhang ZQ, Sun G, Zha TG, Zhu JZ, Shen LH, Chen J, Fang XR, Chen JQ (2009). Quantifying evapotranspiration and biophysical regulations of a poplar plantation assessed by eddy covariance and sap-flow methods. *Chinese*

- Journal of Plant Ecology*, 33, 706–718. [刘晨峰, 张志强, 孙阁, 查同刚, 朱金兆, 申李华, 陈军, 方显瑞, 陈吉泉 (2009). 基于涡度相关法和树干液流法评价杨树人工林生态系统蒸发散及其环境响应. *植物生态学报*, 33, 706–718.]
- Liu K (2018). *Multi Time Scale Characteristics of Evapotranspiration of Artificial Caragana korshinskii Forests in Desert Steppe*. Master degree dissertation, Ningxia University, Yinchuan. [刘可 (2018). 荒漠草原人工柠条林多时间尺度蒸散特征研究. 硕士学位论文, 宁夏大学, 银川.]
- Liu RT, Chai YQ, Xu K, Yang MX, Zhu F (2014). Seasonal changes of ground vegetation characteristics under artificial *Caragana intermedia* plantations with age in desert steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 500–508. [刘任涛, 柴永青, 徐坤, 杨明秀, 朱凡 (2014). 荒漠草原区柠条固沙人工林地地表草本植被季节变化特征. *生态学报*, 34, 500–508.]
- Mac Nish RD, Unkrich CL, Smythe E, Goodrich DC, Maddock III T (2000). Comparison of riparian evapotranspiration estimates based on a water balance approach and sap flow measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 105, 271–279.
- Mo BR, Cai GJ, Yang L, Lu J, Wang ZT, Dang HZ, Wang DF, Qi JL (2013). Soil water use and balance characteristics in mature forest land profile of *Caragana korshinskii* in semiarid loess area. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 4011–4020. [莫保儒, 蔡国军, 杨磊, 芦娟, 王子婷, 党宏忠, 王多锋, 戚建莉 (2013). 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征. *生态学报*, 33, 4011–4020.]
- Mu QZ, Heinsch FA, Zhao MS, Running SW (2007). Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, 111, 519–536.
- Oki T, Kanae S (2006). Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313, 1068–1072.
- Piao SL, Wang XH, Park T, Chen C, Lian X, He Y, Bjerke JW, Chen AP, Ciais P, Tømmervik H, Nemani RR, Myneni RB (2020). Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 14–27.
- Qi XJ, Liu TX, Duan LM, Chen XP, Huang TY (2019). Transpiration and evapotranspiration of *Caragana Microphylla* community measured with the sap flow and eddy covariance methods. *Journal of Desert Research*, 39(4), 73–82. [祁秀娇, 刘廷玺, 段利民, 陈小平, 黄天宇 (2019). 基于茎干液流法和涡度相关法的小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*) 群落蒸散特征. *中国沙漠*, 39(4), 73–82.]
- Qu YP, Kang SZ, Wang SF, Sun HQ (2014). Applicability analysis for measuring evapotranspiration of *Populus alba* var. *Pyramidalis* Bge by sap flow and micro-lysimeter method. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 32(3), 88–94. [屈艳萍, 康绍忠, 王素芬, 孙洪泉 (2014). 液流-株间微型蒸渗仪法测定新疆杨蒸发蒸腾量适用性分析. *干旱地区农业研究*, 32(3), 88–94.]
- Schlesinger WH, Jasechko S (2014). Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189–190, 115–117.
- Seneviratne SI, Corti T, Davin EL, Hirschi M, Jaeger EB, Lehner I, Orlowsky B, Teuling AJ (2010). Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review. *Earth Science Reviews*, 99, 125–161.
- Song LL, Yin YH, Wu SH (2012). Advancements of the metrics of evapotranspiration. *Progress in Geography*, 31, 1186–1195. [宋璐璐, 尹云鹤, 吴绍洪 (2012). 蒸散发测定方法研究进展. *地理科学进展*, 31, 1186–1195.]
- Song NP, Du LT, Wang L (2015). Vegetation dynamics over 2000–2012 and its driving factors in Yanchi County, Ningxia Province. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 7377–7386. [宋乃平, 杜灵通, 王磊 (2015). 盐池县2000–2012年植被变化及其驱动力. *生态学报*, 35, 7377–7386.]
- Soubie R, Heinesch B, Granier A, Aubinet M, Vincke C (2016). Evapotranspiration assessment of a mixed temperate forest by four methods: eddy covariance, soil water budget, analytical and model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228–229, 191–204.
- Wang KC, Dickinson RE (2012). A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, 50, RG2005. DOI: 10.1029/2011RG000373.
- Wang L, Xu YD, Fu BJ, Lü YH (2009). Landscape pattern and eco-hydrological process. *Advances in Earth Science*, 24, 1238–1246. [王朗, 徐延达, 傅伯杰, 吕一河 (2009). 半干旱区景观格局与生态水文过程研究进展. *地球科学进展*, 24, 1238–1246.]
- Wang WN, Zhang X, Zhang LF, Liu XQ, Zhao L, Li Q, Gu S (2019). A comparison study of the evapotranspiration measured by lysimeter and eddy covariance. *Chinese Journal of Ecology*, 38, 3551–3559. [王韦娜, 张翔, 张立锋, 刘晓琴, 赵亮, 李奇, 古松 (2019). 蒸渗仪法和涡度相关法测定蒸散的比较. *生态学杂志*, 38, 3551–3559.]
- Wilson K, Goldstein A, Falge E, Aubinet M, Baldocchi D, Berbigier P, Bernhofer C, Ceulemans R, Dolman H, Field C, Grelle A, Ibrom A, Law BE, Kowalski A, Meyers T, Moncrieff J, Monson R, Oechel W, Tenhunen J, Valentini R, Verma S (2002). Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 223–243.
- Xu JJ, Jin XY, Qiang HF, Dai H, Liang C (2018). Variety characteristics and cause analysis of potential evapotranspiration in the Ebinur Lake Basin in Xinjiang. *Journal of Irrigation and Drainage*, 37(2), 89–94. [许婧璟, 靳晓言, 强皓凡, 戴辉, 梁川 (2018). 新疆艾比湖流域潜在蒸散变化特征与成因分析. *灌溉排水学报*,

- 37(2), 89–94.]
- Yang XG, Zhao W, Chen L, Wang L, Song NP (2015). Antidromal succession between soil and plant in the *Caragana intermedia* shrubland in the desert steppe. *Ecology and Environmental Sciences*, 24, 590–594. [杨新国, 赵伟, 陈林, 王磊, 宋乃平 (2015). 荒漠草原人工柠条林土壤与植被的演变特征. *生态环境学报*, 24, 590–594.]
- Yue GY, Zhang TH, Zhao HL, Niu L, Liu XP, Huang G (2006). Characteristics of sap flow and transpiration of *Salix gordejvii* and *Caragana microphylla* in Horqin Sandy Land, northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 3205–3213. [岳广阳, 张铜会, 赵哈林, 牛丽, 刘新平, 黄刚 (2006). 科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿茎流及蒸腾特征. *生态学报*, 26, 3205–3213.]
- Yue GY, Zhao HL, Zhang TH, Yun JY, Niu L, He YH (2007). Characteristics of *Caragana microphylla* sap flow and water consumption under different weather conditions on Horqin sandy land of northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18, 2173–2178. [岳广阳, 赵哈林, 张铜会, 云建英, 牛丽, 何玉惠 (2007). 不同天气条件下小叶锦鸡儿茎流及耗水特性. *应用生态学报*, 18, 2173–2178.]
- Yue GY, Zhao HL, Zhang TH, Zhao XY, Zhao W, Niu L, Liu XP (2009). Estimation of transpiration in communities dominated by shrub *Caragana microphylla*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33, 508–515. [岳广阳, 赵哈林, 张铜会, 赵学勇, 赵玮, 牛丽, 刘新平 (2009). 小叶锦鸡儿灌丛群落蒸腾耗水量估算方法. *植物生态学报*, 33, 508–515.]
- Zhang K, Kimball JS, Nemani RR, Running SW, Hong Y, Gourley JJ, Yu Z (2015). Vegetation greening and climate change promote multidecadal rises of global land evapotranspiration. *Scientific Reports*, 5, 15956. DOI: 10.1038/srep15956.
- Zhang PJ, Qing H, Zhang L, Xu YD, Mu L, Ye RH, Qiu X, Chang H, Shen HH, Yang J (2017). Population structure and spatial pattern of *Caragana tibetica* communities in Nei Mongol shrub-encroached grassland. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 165–174. [张璞进, 清华, 张雷, 徐延达, 木兰, 晔霁罕, 邱晓, 常虹, 沈海花, 杨劫 (2017). 内蒙古灌丛化草原毛刺锦鸡儿种群结构和空间分布格局. *植物生态学报*, 41, 165–174.]
- Zhang Q, Wang S, Wen XM, Nan YH, Zeng J (2012). An experimental study of land surface condense phenomenon and water budget characteristics over the Loess Plateau. *Acta Meteorologica Sinica*, 70, 128–135. [张强, 王胜, 问晓梅, 南玉合, 曾剑 (2012). 黄土高原陆面水分的凝结现象及收支特征试验研究. *气象学报*, 70, 128–135.]
- Zhang ZS, Li XR, Wang XP, Zhang JG, Liu LC, Tan HJ (2005). Evaporation and transpiration in re-vegetated desert area. *Acta Ecologica Sinica*, 25, 2484–2490. [张志山, 李新荣, 王新平, 张景光, 刘立超, 谭会娟 (2005). 沙漠人工植被区的蒸发蒸腾. *生态学报*, 25, 2484–2490.]
- Zhao W, Yang MX, Chen L, Wang L, Song NP, Yang XG (2015). Structure and dynamics of herbaceous layer vegetation of artificial *Caragana intermedia* shrublands in desert steppe. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 41, 723–731. [赵伟, 杨明秀, 陈林, 王磊, 宋乃平, 杨新国 (2015). 荒漠草原人工柠条林草本层植被的结构与动态. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 41, 723–731.]
- Zhao YN, Yu L, Zhou YR, Wang HM, Ma QH, Lu Q (2020). Soil moisture dynamics and deficit of desert grassland with anthropogenic introduced shrub encroachment in the eastern Ningxia, China. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 1305–1315. [赵亚楠, 于露, 周玉蓉, 王红梅, 马千虎, 陆琪 (2020). 宁夏东部荒漠草原灌丛引入对土壤水分动态及亏缺的影响. *生态学报*, 40, 1305–1315.]
- Zhao YN, Zhou YR, Wang HM (2018). Spatial heterogeneity of soil water content under introduced shrub (*Caragana korshinskii*) in desert grassland of the eastern Ningxia, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 29, 3577–3586. [赵亚楠, 周玉蓉, 王红梅 (2018). 宁夏东部荒漠草原灌丛引入下土壤水分空间异质性. *应用生态学报*, 29, 3577–3586.]
- Zheng QQ (2019). *Landscape Distribution and Biomass Estimation of Caragana intermedia Plantation in Yanchi Desert Steppe based on Remote Sensing Technology*. Master degree dissertation, Ningxia University, Yinchuan. [郑琪琪 (2019). 基于遥感技术的盐池荒漠草原柠条人工林景观分布与生物量估算. 硕士学位论文, 宁夏大学, 银川.]
- Zhu L, Qi YS, Xu X (2014). Water sources of *Medicago sativa* grown in different slope positions in Yanchi County of Ningxia. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 1226–1240. [朱林, 祁亚淑, 许兴 (2014). 宁夏盐池不同坡位旱地紫苜蓿水分来源. *植物生态学报*, 38, 1226–1240.]

责任编辑: 李胜功 编辑: 赵航