

宁夏中部干旱带人工柠条茎流及蒸腾特征研究

余峰¹, 陈林², 王峰², 刘华², 杜建民², 郭永忠², 李浩霞²

(1. 宁夏回族自治区治沙退耕站, 银川 750002; 2. 宁夏农林科学院 荒漠化治理研究所, 银川 750002)

摘要:采用包裹式茎流测定系统, 2010 年 7 月在宁夏盐池对人工栽植的柠条液流蒸腾和环境因子进行了昼夜连续观测, 建立了柠条蒸腾的回归模型。结果表明: 白天枝条液流速率与枝条的粗细呈正相关, 枝条间的液流速率差异在白天大, 夜间小; 在晴天观测到的蒸腾耗水率日变化曲线出现日间降低现象。柠条在夜间存在液流和微弱蒸腾作用。柠条蒸腾耗水率与太阳辐射、气温、空气饱和差和空气相对湿度具有显著的相关性, 得到了蒸腾耗水率与环境因子的回归方程。

关键词:人工柠条; 茎流; 蒸腾; 宁夏

中图分类号: Q948.1; S793.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)02-0143-05

The Study on Sap Flow and Transpiration of Artificial *Caragana korshinskii* in the Arid Area of Central Ningxia Hui Autonomous Region

YU Feng¹, CHEN Lin², WANG Feng², LIU Hua², DU Jian-min², GUO Yong-zhong², LI Hao-xia²

(1. The Desert Control and Returning Farmland Station of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750002, China; 2. Institute of Desertification Control, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

Abstract: In July of 2010, daily sap flow of *Caragana korshinskii* was measured by Dynagage Systems, and the microclimate was monitored by Vantage Pro 2 Station in the stand of *Caragana korshinskii* plantation located in Yanchi County of Ningxia Hui Autonomous Region. The regressive models of transpiration estimated from sap flow were established based on the field observation data. The results showed that there was more sap flow flux founded in bigger diameter branch than that of in smaller one. The difference of sap flow flux between branches is much more significant in the daytime than that of in the night. It was found that there was a noon break phenomenon in the daily course of transpiration in the sunny day. Night-time sap flow and weak transpiration had been detected by Dynagage Systems. Transpiration of *Caragana korshinskii* was well correlated with solar radiation, air temperature, vapor pressure deficit (VPD), relative humidity. The regressive equations between the transpiration and environmental factors were better fitted with observed data.

Key words: artificial *Caragana korshinskii*; sap flow; transpiration; Ningxia Hui Autonomous Region

水是干旱荒漠区植被生长的主导影响因子, 植物根部吸收的水分 99.8% 以上消耗在蒸腾作用上^[1]。然而, 植物蒸腾耗水是一个复杂的植物生理过程和水分运动物理过程, 受多种因子的影响, 处于动态变化之中。因为树木蒸腾耗水量的 99.8% 以上来自树干液流, 所以通常用液流量就可以直接反映出树木的蒸腾耗水能力。在 20 世纪 80 年代, 测定植物蒸腾作用的主要方法是使用快速离体称量法; 90 年代以来主要使用气孔计测定法, 这些方法都是在单叶或小枝水

平上进行测定的。近年来, 随着相关技术进步, 国内已逐步开展用热脉冲技术^[2-4]、热扩散技术^[5-6]和热平衡技术^[7]测定树木液流的方法来实现对树木蒸腾耗水量的精确测量和计算。

柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*) 为豆科锦鸡儿属多年生灌木, 又称柠条、毛条、大白柠条^[8], 是在我国西北地区进行植被恢复所应用的最主要的植物种类之一, 具有很强的抗旱性。随着水危机和荒漠化进程的加剧, 研究荒漠沙生植被耗水量, 确定沙地水

分的合理承载能力,对于旱区生态植被建设与管理有着重要的作用^[9]。要准确地测算树木的蒸腾耗水量,有必要对树干液流动态及其影响因子进行全面分析^[8]。本文采用 Dynamax 公司生产的基于热平衡原理的包裹式液流测定系统实测了不同茎粗的人工柠条典型日茎流,并根据液流速率计算枝条的蒸腾耗水,分析蒸腾耗水率与环境因子的关系,探讨人工柠条的水分利用规律,为土壤水分植被承载力评价和生态环境建设与管理提供依据。

1 研究区概况

研究区选在宁夏盐池县城北部,距县城 10 km 的柳杨堡乡,位于北纬 $37^{\circ}47'$,东经 $107^{\circ}30'$,海拔 1 320~1 415 m,北接内蒙古自治区鄂托克前旗,东连陕西省定边县,为毛乌素沙地西南缘的一部分。该乡属于典型中温带大陆性气候,年均气温 8.1°C ,极端最高温为 34.9°C ,极端最低温为 -24.2°C ,年降水量仅 288.3 mm(近 50 a 平均值),主要集中在夏秋两季,7—9 月降水占全年的 60%,季节变化和年际变化较大,而蒸发量高达 2 710 mm,干燥度 3.1,无霜期 128 d, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $2\ 945^{\circ}\text{C}$,pH 值 8.5~9.0。

研究区内有东西走向的两条覆沙梁地,分布有大面积的流动、半流动沙地,土壤以灰钙土、风沙土为主。

表 1 SGB 探头规格和工作参数及被测样株基本特征

探头型号	茎杆直径			测量计高度/ mm	输入电压/ V	典型能耗/ W
	最小/mm	典型/mm	最大/mm			
SGB9-WS	8	10	12	70	4	0.1
SGB16-WS	15	17	19	70	4	0.2
SGB25-WS	24	28	32	110	4.5	0.5

表 2 测定液流的柠条枝条的一些参数

参数	枝条 1(粗)	枝条 2(中)	枝条 3(细)
探头类型	SGB25	SGB16	SGA10
测定部位直径/mm	27.88	17.12	9.64
断面积/ mm^2	610.18	230.08	72.95
枝干重/g	513.18	188.29	77.92
叶干重/g	53.92	19.93	9.08
枝叶干重/g	567.10	208.22	87.00
枝/叶比	9.52	9.45	8.58

2.2 环境因子测定

气象因子采用 Vantage Pro 2 自动气象站测定地面 2 m 以内的太阳辐射、空气温度、空气饱和差、相对湿度、土壤温度。

2.3 蒸腾耗水率计算

蒸腾耗水率是指单位时间内单位枝条重的蒸腾耗水量,根据式(1)计算。

$$E_i = F_i / W_i \quad (1)$$

2 研究方法

2.1 茎流测定

在 2010 年 7 月典型晴天日首先对研究区的人工柠条进行直径调查,根据探头的大小,分别选择生长良好、有代表性、主干通直的 3 个不同直径的枝条,利用 Dynamax 公司生产的热平衡包裹式茎流计测定枝条的液流量。

Dynamax 茎流仪的安装过程:首先选择适合液流探头测定直径范围的枝条,用砂纸轻轻将茎干打磨光滑,然后用游标卡尺精确测定树干直径,仔细将包裹式探头安装于被测区,用铝箔包裹,以防止太阳辐射,最后用胶带密封,防止雨水进入。

将进行数据传输的电缆线与数据采集器相应的接口进行连接,数据采集器的电源线与外接电池接通。将数据采集器与装有数据采集软件的笔记本电脑连通,然后设置测定样木的茎干类型、面积、时间、数据采集时间间隔等,本研究数据采集时间为每 10 s 采集 1 次数据,每 10 min 将所获得的数据平均 1 次并存储,实现观测数据的自动采集,然后定期用电脑采集数据。

本文所用探头的型号及技术指标和被测样株基本特征见表 1—2。

式中: E_i ——蒸腾耗水率 $[\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})]$; F_i ——测定枝条的液流速率 (g/h) ; W_i ——测定枝条的干重 (g) 。

2.4 数据处理

柠条液流变化与环境因子间的相关关系以及回归方程均采用统计分析软件 SPSS 12.0 进行分析获得,文中用图由 Excel 2003 完成。

3 结果分析

3.1 不同茎粗柠条液流速率变化

总的来看,人工柠条茎干液流日变化趋势大致相同,有明显的昼夜节律性,白天茎干液流速率大,呈多峰曲线,晚上茎干液流速率明显减小,且变化幅度不大。在 2:00 和 5:30 间枝条液流量最低,此时不同枝条间液流差异也降到了最低;而这种差异在白天表现最为明显,其中在 10:30—15:00 间差异最大,到下午这种差异逐渐缩小。茎杆液流在 5:30 开始呈明显上

升趋势,10:00左右出现峰值,并在8:00—17:30维持较高值,17:30以后液流开始迅速下降,到20:30时基本下降至极低值,以后进行夜间液流的缓慢传输。这是由于在毛乌素沙地干旱的气候条件下,白天气温高、空气干燥,灌丛蒸腾作用强烈、造成植物体内水分供需平衡失调^[5]、植物体处于缺水状态,于是夜间蒸腾停止后,在根压的作用下根系继续保持吸水能力,以补充白天蒸腾引起的水分亏缺^[10-11]。

在一天内,受同一环境因子影响,不同茎粗的柠条液流速率波动趋势基本一致,但液流速率较高的植株的液流波动幅度明显要大,说明液流速率越大,越容易受环境因子的影响而波动。这和赵奎等^[12]的研究结论一致。太阳辐射强度能诱导叶片气孔启闭,同时又决定空气温度、相对湿度,是影响柠条液流变化的最主要因子,液流启动、降低和峰值出现的时间与光照紧密相关。树干液流与光合有效辐射等环境因子之间存在时滞效应^[12],本研究结果也有相同结论(见图1)。

从图1可以看出,3个枝条的单位时间液流速率存在明显差异,枝条1(粗)>枝条2(中)>枝条3(细),即液流速率与枝条粗细呈正相关,这和许多学者得出的结论一致^[12-14]。最粗的枝条(枝条1)液流速率最大,主要是由于它拥有的叶片最多和重量最大(见表2),可以形成最大的蒸腾拉力和耗水量;相反,最细的枝条(枝条3)上叶片重量最小,最小的蒸腾叶面积导致最小的液流速率。枝条2叶片量介于枝条1和枝条2之间,因而液流量也居中。

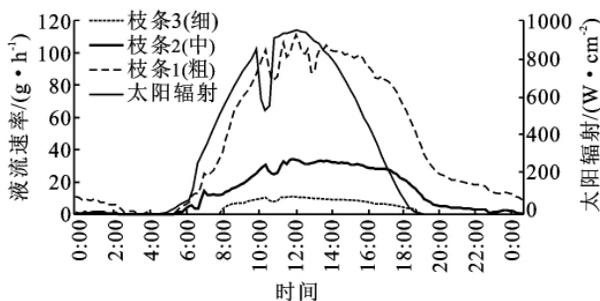


图1 不同茎粗柠条枝条日液流

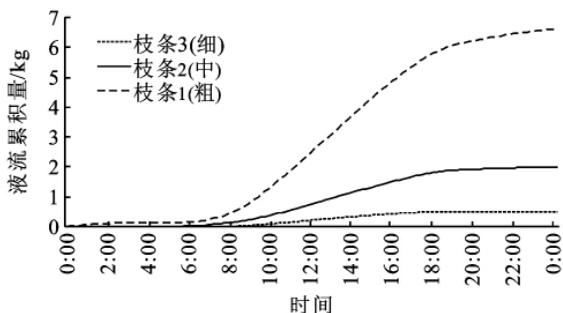


图2 不同茎粗液流日累积量

图2是不同茎粗的人工柠条液流累积量曲线。可以看出,不同直径的柠条液流累积量有明显差异。液流日累计曲线符合生物生长的“S”型生长曲线,枝条1—3的日累计液流量分别为6 627.02 g、1 985.25 g和505.31 g,平均液流量分别为45.08, 13.51, 3.44 g/(cm²·h),直径较大者耗水量明显增大,说明随着柠条的生长,其耗水量有一个不断增大的过程。

3.2 不同茎粗柠条蒸腾耗水率比较

尽管3个枝条的液流速率存在明显差异,但枝条的蒸腾耗水率(见图3)差异不大。3个枝条均表现出非常相似的日变化规律,即蒸腾在清晨日出后开始启动,之后快速升高,在中午达到高峰,午后出现短暂的午间降低现象,之后蒸腾耗水率逐渐降低,在夜间达到最低或者停止。对比测定日的太阳辐射可以看出,在观测日太阳辐射变化曲线在10:20时有一个突然降低,主要是短暂的云遮掩所致,蒸腾随着“滞后”现象的发生而有所降低。当日柠条枝条蒸腾耗水的午间降低,可认为是蒸腾“午休”现象,即蒸腾曲线为“双峰”型。蒸腾午休现象在枝条1(粗)和枝条2(中)较明显,枝条3(细)蒸腾耗水在午后呈波浪式下降趋势,难于判断出蒸腾午间降低现象。通过测定发现午间蒸腾降低现象对较细(9.64 mm)枝条不易观测到,而较粗枝条(17.12 mm和27.88 mm)则比较明显。

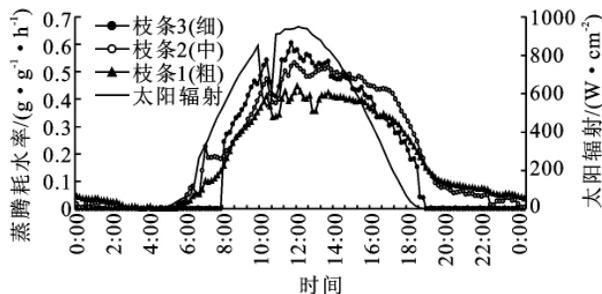


图3 枝条蒸腾耗水率

图3还可以看出枝1(粗)和枝条2(中)在太阳落山时的19:00仍然有微量的夜间蒸腾,一直到次日2:20以后才完全停止蒸腾,因此,更可以断定夜间液流主要是补偿白天的枝条蒸腾造成的水分亏缺。

通过分析数据发现柠条夜间蒸腾耗水与枝条粗细有关,枝条1(粗)夜间(19:00到次日6:00)液流量最大,占全天蒸腾耗水量13.25%,枝条2(中)居中,占7.72%,枝条3(细)为0.002%,几乎没测到夜间液流。因此可以看出,夜间液流占全天蒸腾耗水量的百分比与枝条粗细呈正相关。3个枝条平均的夜间液流量占全天蒸腾耗水量的6.99%。

3.3 蒸腾耗水率与环境因子关系

根据同步观测的时间步长为10 min的昼夜环境因子与柠条枝条蒸腾耗水率的相关分析(表3)表明,

蒸腾耗水率(E_i)与所有测定的环境因子均有显著和极显著的相关关系,相关系数大小顺序为:太阳辐射(R)>气温(T_a)>空气饱和差(VPD)>相对湿度(R_H)>土壤温度(T_s)。其中除蒸腾耗水率与相对湿度呈负相关外,其他均呈正相关关系。

表 3 柠条枝条蒸腾耗水率与环境因子的相关分析

项目	E_i	R	T_s	T_a	VPD	R_H
E_i	1.00					
R	0.88**	1.00				
T_s	0.20*	-0.08	1.00			
T_a	0.79**	0.55**	0.73**	1.00		
VPD	0.76**	0.47**	0.78**	0.98**	1.00	
R_H	-0.73**	-0.45**	-0.73**	-0.98**	-0.96**	1.00

** 相关显著性达到 0.01 水平; * 相关显著性达到 0.05 水平。

表 4 柠条蒸腾耗水率与环境因子的多元回归分析

模型	回归方程	R^2
1	$E_i = 0.11 + 4.38 \times 10^{-4} R$	0.78**
2	$E_i = -0.33 \times 10^{-2} + 3.31 \times 10^{-4} R + 2.0 \times 10^{-2} T_a$	0.91**
3	$E_i = -1.05 \times 10^{-2} + 3.33 \times 10^{-4} R + 0.12 \text{VPD}$	0.93**
4	$E_i = 0.91 + 1.56 \times 10^{-4} R + 0.30 \text{VPD} - 4.11 \times 10^{-2} T_s$	0.96**
5	$E_i = 0.57 + 1.22 \times 10^{-4} R + 0.42 \text{VPD} - 4.71 \times 10^{-2} T_s + 4.81 \times 10^{-3} R_H$	0.97**
6	$E_i = 0.16 + 8.98 \times 10^{-5} R + 0.40 \text{VPD} - 0.13 \times 10^{-2} T_s + 7.11 \times 10^{-3} R_H + 1.57 \times 10^{-2} T_a$	0.98**

4 结论与讨论

(1) 人工柠条茎干液流日变化昼夜节律性明显,白天茎干液流速率大,呈多峰曲线,晚上茎干液流速率明显减小,且变化幅度不大。不同茎粗的柠条液流速率波动趋势基本一致,但液流速率越大的植株越容易受环境因子的影响而波动。液流与光合有效辐射等环境因子之间存在时滞效应。不同茎粗的人工柠条液流日累计曲线符合生物生长的“S”型生长曲线,但随着柠条直径的增加,其耗水量是不断增大的过程。本研究中 3 个不同茎粗的柠条枝条液流峰值出现的时间几乎相同(见图 1),并没有表现出徐先英等^[16]关于地茎越细,峰值出现时间越早,地茎越粗,峰值出现越晚这一结论,这可能与测定时柠条不同的生理期和叶片生理活性有关。

(2) 程积民^[17]采用快速称重法研究了固原地区的柠条蒸腾强度日变化,认为蒸腾曲线为双峰型,第一高峰在 12:00 左右,第二高峰在午休后。而王孟本等^[18]同样用快速称重法在晋西北河曲县(年降水量 447.5 mm)研究了柠条和 3 种杨树的蒸腾日变化,虽然它们出现过准双峰型和旗型,但根据不同测期蒸腾与光照强度之间显著的相关关系和光照强度的明显单峰曲线特点认为这些植物的蒸腾日变化趋向一般为单峰型。柠条的蒸腾峰值多在 12:00—14:00,属非蒸腾午休型^[19]。

利用 SPSS 12.0,采用逐步回归方法,以 5% 的可靠性作为因变量的入选和剔除临界值,对所测定的液流与上述气象因素进行了多元逐步回归模型分析(表 4),结果表明:对柠条蒸腾耗水最重要的前 3 个因子是太阳辐射(R)、空气饱和差(VPD)和气温(T_a)。由于研究地区比较干旱,土壤水分相对稳定而匮乏,以柠条的蒸散量来看,会使植物蒸腾耗水率维持稳定的低水平。从而提出假设:在当地条件下,柠条群落蒸腾日内变化主要受太阳辐射、温湿度等影响,而受土壤水分因素的影响很小^[15]。因此,通过逐步回归方法建立的蒸腾与环境因子的模型能够用于计算该地区群落 7 月的蒸腾耗水量。

快速称重法的不足是离体和非连续性测定,而且测定间隔也较长,一般为 1~2 h,因此,很难判断出柠条微弱的午间降低即“双峰”现象;气孔计法测定虽然也受叶室环境影响,需大量重复测定才能得出较可信的结果。本文采用的是不离体连续记录的测定技术,通过测定液流速率的变化可以准确判断出枝叶蒸腾失水,由于测定记录间隔可任意自设(本文设定 10 min),很容易监测到柠条午间蒸腾的细微变化、蒸腾降低的时间和程度。本文发现柠条枝条越粗,其午间蒸腾现象越明显,这可能是快速称重法和气孔计法较难确定柠条有午间降低现象的原因所在。

由于测定方法和仪器原因,研究者很少测定植物夜间液流(蒸腾)问题,一般假设气孔夜间关闭^[20-21],然而有些植物无论夜间空气饱和还是亏缺,其气孔一直保持开放状态并维持着夜间蒸腾^[22],即使气孔夜间完全关闭,水分也会伴随着表皮层的传导而散失^[23-24]。李录章^[25]曾观察到柠条气孔夜间微开并有微弱的蒸腾现象,但未给出定量结果。本文测定中没有发现日落柠条液流马上停止的现象,而是缓慢降低,在 2:20—5:00 达到最低值。

(3) 根据同步观测的环境因子与柠条枝条蒸腾耗水率的相关分析表明,蒸腾耗水率与所有测定的环境因子均有显著和极显著的相关关系:太阳辐射>气温>空气饱和差>相对湿度>土壤温度。其中除蒸腾耗水率与相对湿度呈负相关外,其他均呈正相关关

系。对所测定的液流与上述气象因素进行了多元逐步回归模型分析,结果表明:对柠条蒸腾耗水最重要的前3个因子是太阳辐射空气饱和差(VPD)和气温。实际应用中可根据需要选择合适的回归方程估算柠条枝条的蒸腾耗水量。

由于本研究观测柠条液流的时段较短,得到的回归模型的敏感性和精确性还有待在今后的工作中进一步修正和补充。

参考文献:

- [1] 罗中岭. 热量法径流测定技术的发展与应用[J]. 中国农业气象, 1997, 18(3): 52-57.
- [2] 刘奉觉, Edwards W R N, 郑世锴, 等. 杨树树干液流时空动态研究[J]. 林业科学研究, 1993, 6(4): 368-372.
- [3] 李海涛, 陈灵芝. 应用热脉冲技术对棘皮桦和五角枫树干液流的研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(1): 1-6.
- [4] 熊伟, 王彦辉, 徐德应. 宁南山区华北落叶松人工林蒸腾耗水规律及其对环境因子的响应[J]. 林业科学, 2003, 39(2): 1-7.
- [5] 王华田, 马履一. 油松、侧柏深秋边材木质部液流变化规律的研究[J]. 林业科学, 2002, 38(5): 31-37.
- [6] 孙慧珍, 周晓峰, 赵惠勋. 白桦树干液流的动态研究[J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1387-1391.
- [7] 严昌荣, Alec Downey, 韩兴国, 等. 北京山区落叶阔叶林中核桃楸在生长中期的树干液流研究[J]. 生态学报, 1999, 19(6): 793-797.
- [8] 夏永秋, 邵明安. 黄土高原半干旱区柠条树干液流动态及其影响因子[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1376-1382.
- [9] 夏桂敏, 康绍忠, 李王成, 等. 甘肃石羊河流域干旱荒漠区柠条树干液流的日季变化[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1186-1193.
- [10] 王华田, 马履一. 利用热扩式边材液流探针测定树木整株蒸腾耗水量的研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(6): 661-667.
- [11] 张小由, 康尔泗, 张智慧, 等. 黑河下游天然胡杨树干液流特征的试验研究[J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 742-746.
- [12] 赵奎, 丁国栋, 吴斌, 等. 宁夏盐池毛乌素沙地柠条锦鸡

儿茎流及蒸腾特征[J]. 干旱区研究, 2009, 26(3): 390-395.

- [13] 常学向, 赵文智, 张智慧. 荒漠区固沙植物梭梭(*Haloxylon ammodendron*)耗水特征[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1826-1837.
- [14] 许浩, 张希明, 阎海龙, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地多枝柽柳茎干液流及耗水量[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 735-741.
- [15] 沈振西. 宁夏南部柠条、沙棘和华北落叶松的液流与蒸腾耗水特性[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2005.
- [16] 徐先英, 孙保平, 丁国栋, 等. 干旱荒漠区典型固沙灌木液流动态变化及其对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 895-905.
- [17] 程积民, 董建国. 上黄试区主要灌木树种蒸腾作用的试验研究[J]. 水土保持通报, 1995, 15(2): 22-25.
- [18] 王孟本, 李洪建, 柴宝峰, 等. 树种蒸腾作用、光合作用和蒸腾效率的比较研究[J]. 植物生态学报, 1999, 23(5): 401-410.
- [19] 董学军, 杨宝珍, 郭柯, 等. 几种沙生植物水分生理生态特征的研究[J]. 植物生态学报, 1994, 18(1): 86-94.
- [20] Meidner H, Mansfield T A. Stomatal responses to illumination[J]. Biological Reviews, 1965, 40: 483-509.
- [21] Ritchie J T. Atmospheric and soil water influences on the plant water balance[J]. Agricultural Meteorology, 1974, 14: 183-198.
- [22] Muchow R C, Ludlow M M, Fisher M J et al. Stomatal behaviour of kenaf and sorghum in a semiarid tropical environment: I. During the night[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1980, 7: 609-619.
- [23] Boyer, J S, Wong S C, Farquhar, et al. CO₂ and water vapor exchange across leaf cuticle (epidermis) at various water potentials[J]. Plant Physiology, 1997, 114: 185-191.
- [24] Hoad S P, Grace J, Jeffree C E. Humidity response of cuticular conductance of beech (*Fagus sylvatica* L.) leaf discs maintained at high relative water content[J]. Journal of Experimental Botany, 1997, 48: 1969-1975.
- [25] 李录章. 花棒、柠条蒸腾作用的研究[J]. 内蒙古林业, 1999(6): 33.

(上接第142页)

- [5] 金菊良, 魏一鸣. 复杂系统广义智能评价方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [6] 金菊良, 丁晶. 水资源系统工程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2002.
- [7] 徐建新, 郭文献, 卢双宝. 区域雨水资源开发利用潜力的

灰色关联分析与评价[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(3): 51-52.

- [8] 佟长福, 史海滨, 李和平, 等. 基于灰色关联分析的鄂尔多斯市水资源承载力评价[J]. 节水灌溉, 2009(11): 43-49.
- [9] 朱锁, 丛立明, 陈信民. 内蒙古鄂尔多斯地区水资源现状分析及可持续利用对策[J]. 地下水, 2009, 31(5): 51-53.