

黄土高原半干旱区柠条 (*Caragana korshinskii*) 树干液流动态及其影响因子

夏永秋^{1,2}, 邵明安^{3,*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要:应用热脉冲技术在黄土高原神木县六道沟小流域于 2006 年 6 月 13 至 25 日测定了两种不同密度柠条 (*Caragana korshinskii*) 群落的树干液流动态。同时测量了土壤水分、太阳辐射、大气温度、相对湿度、风速、水汽压亏缺和作物参考蒸散等环境因子, 并根据植物蒸腾的 P-M 公式, 反推计算冠层导度。结果表明, 除风速外, 柠条树木液流与太阳辐射、大气温度、相对湿度、水汽压亏缺、作物参考蒸散均显著相关, 且可用太阳辐射的线性表达式来估测。不同密度群落的日蒸腾量随叶面积指数增大而增加, 叶面积指数为 2.3 的群落平均日蒸腾为 $3.83 \text{ mm d}^{-1} \text{ m}^{-2}$, 而叶面积指数为 1.1 的林分平均日蒸腾 $1.64 \text{ mm d}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 。冠层导度与气象因子关系复杂, 当土壤水分不存在亏缺时, 冠层导度与太阳辐射、大气温度、作物参考蒸散因子显著相关, 与水汽亏缺和相对湿度因子无相关性; 当土壤水分存在亏缺时, 冠层导度与太阳辐射、大气温度、作物参考蒸散因子无相关关系, 而与水汽亏缺和相对湿度因子显著相关。

关键词:黄土高原; 柠条 (*Caragana korshinskii*); 树干液流; 冠层导度; 叶面积指数; 气象因子

文章编号: 1000-0933(2008)04-1376-07 中图分类号: Q948 文献标识码: A

The sap flow dynamics of *Caragana korshinskii* and the influence of environmental factors in semi-arid region of the Loess Plateau

XIA Yong-Qiu^{1,2}, SHAO Ming-An^{3,*}

1 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3 Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Education, Institute of Soil and Conservation, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forest, Yangling 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1376 ~ 1382.

Abstract: Measurements of sap flow were made in two 20-year-old *Caragana korshinskii* stands that largely differed in tree density for the period of 13 – 25 June 2006 in Liudaogou catchment in Loess Plateau of China. Soil water content, air temperature, relative humidity, solar radiation, wind speed, grass reference evapotranspiration (ET_0), and water vapor pressure deficit (VPD) were also measured, and the actual canopy conductance was calculated from the inverted Penman-Monteith equation based on the actual data of stand transpiration. The results showed that the sap flows were closely coupled to the changing weather conditions except wind speed and could be tightly fitted to a simple linear equation of radiation. The

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB106803); 中国西部环境与生态重大研究计划资助项目(90502006)

收稿日期:2007-01-25; **修订日期:**2007-09-17

作者简介:夏永秋(1979 ~), 男, 湖南邵阳人, 博士生, 主要从事生态水文研究. E-mail: xiayongqiu@gmail.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by of China Basic Research Program (No. 2007CB106803) and National Natural Science Foundation of China (No. 90502006)

Received date: 2007-01-25; **Accepted date:** 2007-09-17

Biography: XIA Yong-Qiu, Ph. D. candidate, mainly engaged in ecohydrology. E-mail: xiayongqiu@gmail.com

transpiration from the two studied stands was effectively scaled by leaf area index. Canopy transpiration of the high density stand with LAI 2.3 reached in averaged of $3.83 \text{ mm d}^{-1} \text{ m}^{-2}$ compared with $1.64 \text{ mm d}^{-1} \text{ m}^{-2}$ for the stand with LAI 1.1 of the low density stand. The analysis of canopy conductance showed no meaningful responses to radiation, air temperature and ET_0 but excellent fits to VPD and relative humidity in the case of soil drought. On the contrary, no correlativity of canopy conductance to VPD and relative humidity was observed in case of soil wet condition, though canopy conductance was tightly fitted to radiation, air temperature and ET_0 .

Key Words: the Loess Plateau; *Caragana korshinskii*; sap flow; canopy conductance; Leaf Area Index; climatic factors

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。其抗逆性和抗旱性强,是水土保持、防风固沙的优良树种。目前,黄河流域水土流失严重和黄河河道严重淤积,已成为影响和制约区域经济社会可持续发展的主要障碍。很多研究表明,植树造林恢复植被是减少水土流失的有效措施^[1]。为了改善该区生态环境,多年来我国在黄土高原开展了大面积的植树种草工作^[2,3],然而,造林成活率低的问题突出^[4],这反映出植树造林还缺乏科学性,特别是关于土壤水分和林木生态需水规律的深入了解。随着全球变暖和变旱的加剧,在黄土高原半干旱区,土壤水分成为制约植物生长以及植被重建的关键因子^[5]。因此,研究干旱区植被耗水量,确定土壤水分的合理承载力,对于该区生态植被建设与环境管理有着重要作用^[6]。

树干液流受多种因子的影响,处于动态变化之中。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。热脉冲技术(Heat Pulse Technique)是20世纪90年代以来测定植物蒸腾的一种越来越成熟的技术^[7~10]。它依据热补偿性原理,能在树木自然生长状态下和不受环境条件及树冠结构及根系特性影响的条件下,测量树干木质部上升液流的速度及流量,从而间接确定树冠蒸腾耗水量,具有较高的准确性和简便性^[9~11]。但是,如何更好地了解树干液流动态和各种因子的关系,成为植物生理学家急需解决的问题。本文应用热脉冲技术定量测量黄土高原半干旱区成年柠条自然生长条件下的树干液流通量,并分析液流的动态规律以及与气象因子、土壤水分、林分密度之间的关系,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 试验概况与方法

1.1 试验区概况

本试验在位于黄土高原北端的陕西神木县六道沟小流域内进行,处在东经 $110^{\circ}21'$,北纬 $38^{\circ}47'$ 。本区属中温带半干旱气候,气候变化剧烈,年平均气温 8.4°C ,1月份平均最低温 -9.7°C ,7月份平均最高温度 23.7°C 。年均降水量 437.4mm ,其中6~9月份降水约占全年的77.4%。植被类型为干旱草原,地带性植被为温带草原植被景观,天然植被大部分已遭破坏,残存的天然草场也已退化严重,长茅草、达乌里胡枝子、沙竹等沙生植物分布比较广泛。沙柳、柠条及沙蒿等灌木、半灌木在该区占据较重要的地位。

在试验小流域内选取了东、西两块 $4\text{m} \times 6\text{m}$ 的沙地试验小区,为防止周边水分流入小区,四周围有75cm高的石棉瓦(其中埋入土壤深度为60cm)。两小区相距约10m,其中东小区柠条生长茂盛,平均密度为 6500 丛/hm^2 ,叶面积指数为2.3;西小区柠条稀疏,密度约为 2100 丛/hm^2 ,叶面积指数为1.1。两个小区的林龄均为20年生,平均株高1.64m,无地被植物。距试验区约200m处有自动气象站。在两小区内各埋有6m中子管和3mTDR管,用于测定土壤水分。

1.2 试验方法

本试验共应用了6个包裹式液流计传感器,分别为Dynamax公司的SF10142、SF10143、SF10144、SF10145、SF10146、SF10147,测量直径范围分为3组:8~12mm、12~16mm、18~23mm。试验于2006年6月13日开始,6月25号结束。首先对两小区的柠条进行直径调查,根据热扩散探头的大小,分别在两小区内选择生长良好、有代表性、主干通直的3株柠条的枝条。取样间隔时间为10min。由测定的树木液流和小区内

的直径分布估算林分的蒸腾。

深层土壤水分(3~6m)采用中子仪测定,浅层土壤水分(0~3m)用 TDR 测定,测定土壤层次在上层(0~1m)为 10cm,在 1m 以下时为 20cm;测定时间间隔为 5d,雨后加测。土壤容重采用挖剖面方法测得,并取土烘干校正中子仪和时域反射仪测得的土壤含水量。

自动气象站高度为 2m,每 1h 记录一次太阳辐射(Kipp& Zonen; CNR-1; 175 cm)、风速(Young; 03001; 220 cm)、降雨(Davis Inst. Corp.; Rain Collector II)、大气温度(Vaisala; HMP45A; 150 cm)、湿度(Vaisala; HMP45A; 150 cm)等指标。

试验结束后,把样木齐地砍下,叶面积指数用方格纸法测定,胸径用游标卡尺测定,树高用皮尺测定,并测定样木的干重和湿重。

1.3 冠层导度

根据作物参考蒸散的 P-M 公式,可以反推冠层导度公式:

$$g_c = 1 / [\Delta \times R_n r_a / (\lambda E \times \gamma) + \rho \times C_p VPD / (\lambda E \times \gamma) - \Delta \times r_a / \gamma - r_a]$$

式中, g_c 为冠层导度($s\ m$), Δ 为饱和水汽压-温度的斜率($Pa\ k^{-1}$), R_n 冠层上方净辐射通量($W\ m^{-2}$) $R_n = 0.8R_s$, R_s 为测量的短波辐射($W\ m^{-2}$), ρ_a 为恒定气压下空气密度($1225\ g\ m^{-3}$), λ 为水的气化潜热($2465\ J\ g^{-1}$), C_p 为恒定气压比热($1.01\ J\ g^{-1}\ k^{-1}$), γ 为干湿球常数($65.5\ Pa\ k^{-1}$), VPD 为水汽压亏缺(Pa)。

r_a 为空气动力学阻力($s\ m^{-1}$),可通过下式计算:

$$r_a = \ln[(z_h - z_d)/z_0]^2 / u \times k^2$$

式中, z_h (m) 为冠层上方参考高度, z_d (m) 为位移高度 $z_d = 0.67h_c$, h_c (m) 为冠层平均高度, z_0 (m) 为粗糙度长度 $z_0 = 0.123h_c$, k 为 Karman 常数,通常取 0.41。

2 结果与讨论

2.1 气象因子与树干液流

图 1 为 2006 年 6 月 13 日至 2006 年 6 月 25 日柠条树干液流与气象因子的变化规律图。在早晨太阳辐射弱、气温低、相对湿度高,柠条树干液流小;随着太阳辐射的逐渐增大、气温增高、空气相对湿度变小,液流速度上升很快,在 11:00 左右达到最大。而后随着光照强度的减弱,温度降低,叶内外水汽压差的减小,液流速度减小;到日落时,液流速度降低为最小值。而在晚上,虽然土壤水分含量低(平均 6.71%),液流仍在 $5\ g\ h^{-1}$ 左右,这可能是因为植物为了补充体内的水分亏缺,通过根压作用主动进入植物体内来补充白天蒸腾失水,恢复植物体内水分平衡。由于在 6 月 20 日有约 30mm 的降雨,空气湿度增大,太阳辐射、气温和水汽压亏缺降低,树干液流也降低。此后几天,虽然太阳辐射值不如降雨前几天的太阳辐射值高,但由于土壤水分含量的恢复(平均为 10.65%),树木液流并没有减少太多。从图 1 还可以看出,树干液流与各气象因子变化具有不同步性,当与气象因子成正相关时,树干液流的最高值要比气象参数最高值早 2h 左右;反之,树干液流的最高值比气象参数最高值晚约两小时。一方面可能是植物生理反应对气象因子有滞后过程,另一方面是高温、强辐射、高水汽压亏缺可能会对植物蒸腾造成胁迫。通过 SPSS 统计分析,除风速外,柠条树干液流与太阳辐射、温度、水汽压亏缺和相对湿度成显著相关(表 1),其中相对湿度与树木液流成负相关,其它气象因子与树木液流均成正相关,其相关程度随太阳辐射、温度、水汽压亏缺、相对湿度的顺序依次降低。由于和太阳辐射的相关系数最大,因此可用太阳辐射的简单表达式来预测柠条树木液流: $Y = 0.0561X + 8.615$ ($R^2 = 0.787$, 回归方程两回归系数检验的显著性水平都小于 0.01), Y 为林分树木液流($g\ h^{-1}$), X 为太阳短波辐射($W\ m^{-2}$)。

由表 1 还可以看出,作物参考蒸散 ET_0 和柠条树干液流成极显著相关关系,说明用作物参考蒸散模拟柠条树干液流动态变化是可行的。

2.2 叶面积指数与树干液流

柠条主要通过叶片实现蒸腾,林分密度越大、每丛柠条分枝越多、每枝柠条叶片数越多,因此总叶面积大,林分的总蒸腾也越大。图 2 为两个不同叶面积指数小区的树干液流对比。两种林分蒸腾有很好的一致性。

表 1 柠条树干液流与气象因子的 Pearson 相关系数

Table 1 Pearson correlation coefficient of tree sap flow to climatic drivers

气象因子 Climatic factors	风速 Wind speed	太阳辐射 Solar radiation	温度 Temperature	VPD	相对湿度 Relative humidity	ET ₀
E(1)	0.004	0.887 **	0.575 **	0.568 **	-0.391 **	0.820 **
E(2)	0.005	0.824 **	0.617 **	0.574 **	-0.434 **	0.785 **
E(3)	0.004	0.891 **	0.539 **	0.581 **	-0.411 **	0.819 **
E(4)	0.011	0.783 **	0.543 **	0.561 **	-0.383 *	0.832 **
E(5)	0.031	0.908 **	0.523 **	0.566 **	-0.421 **	0.807 **
E(6)	0.006	0.877 **	0.562 **	0.541 **	-0.401 **	0.811 **

* 和 ** 分别表示该值在 $P=0.05$ 和 $P=0.01$ 的水平上显著; E(1) ~ E(6) 为 6 个茎流计探头对应柠条树木液流 The values marked * and ** mean they are significant at $P=0.05$ and $P=0.01$, respectively; E(1) ~ E(6) are sap flow of *Caragana korshinskii* for each of 6 probes, respectively

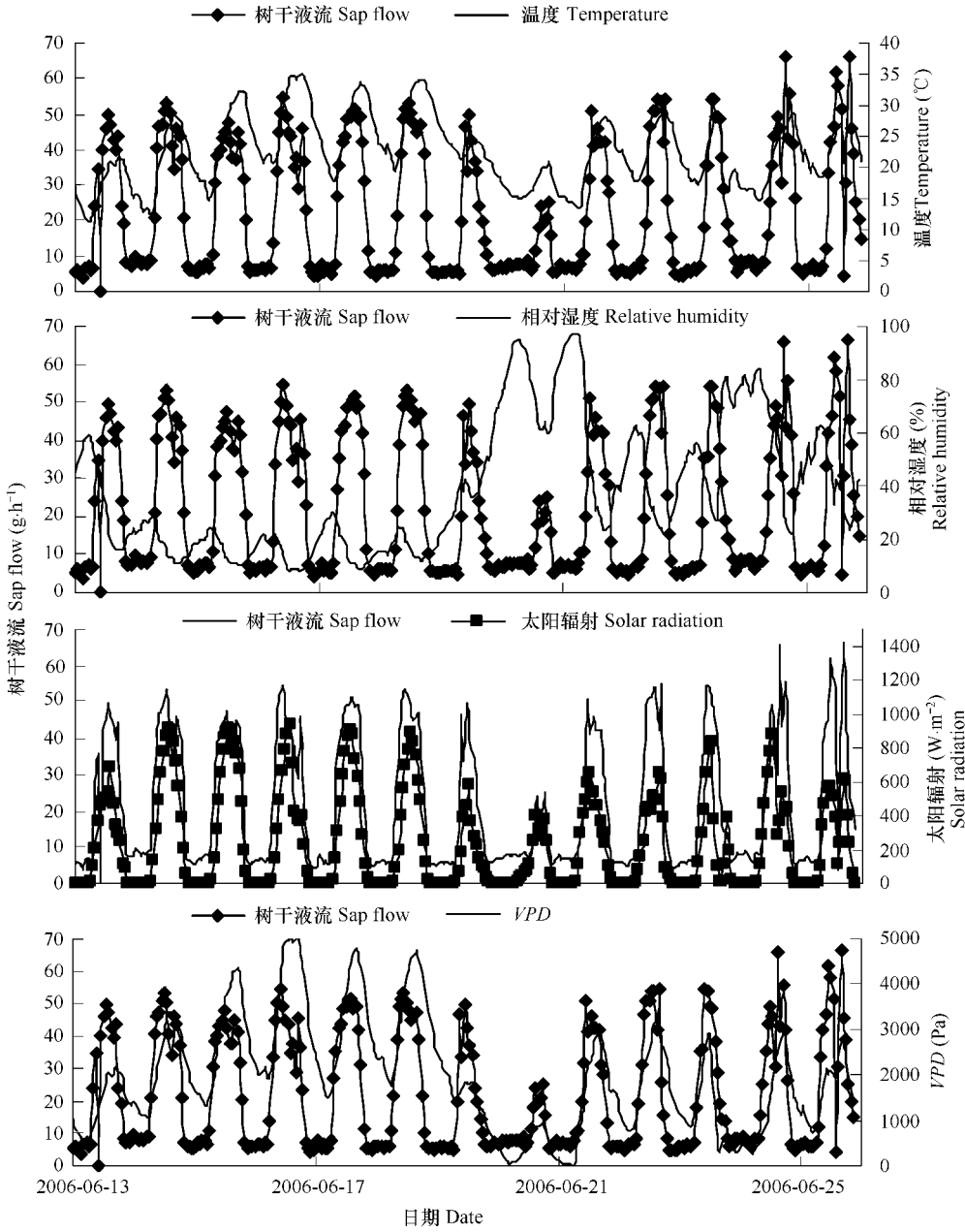


图 1 柠条树干液流与气象因子之间的关系

Fig. 1 Relationships between sap flows and climatic factors

高密度(叶面积指数 2.3)林分在测定期间平均日蒸腾为 $3.64 \text{ mm d}^{-1} \text{ m}^{-2}$, 低密度林分(叶面积指数 1.1)平均日蒸腾为 $1.83 \text{ mm d}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 。在晚上, 低叶面积指数柠条林的液流要小于高叶面积指数的柠条林, 这可能在于稀疏林的蒸腾较小, 土壤水分相对较高, 植物体内水分亏缺较小, 所以通过根压作用以水分主动方式进入体内来补充白天植物蒸腾失去的水分也少。当土壤水量减少, 土壤保水能力增强, 增加水分流向根部的阻力; 另外随着土壤含水量减少, 土壤水势降低, 在相同的大气条件下, 减小了土壤-植物-大气水势梯度, 所以植物从干旱土壤中吸收水分速率降低。因此, 在林草建设布局时, 应该充分调查区域的土壤水分值, 在土壤水分充足的地方, 可以增加种植密度以发挥植被更优的水保功能; 在土壤水分缺乏的地方, 应尽量降低植被密度, 以免形成土壤干层, 造成生态环境的进一步恶化。

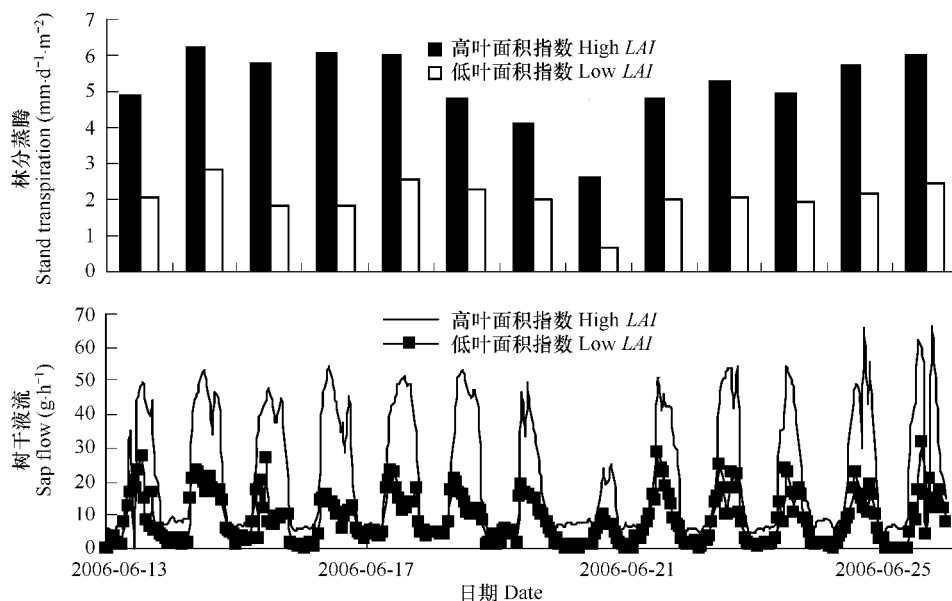


图2 不同叶面积指数林分蒸腾的动态

Fig. 2 Transpiration dynamics of two stands differed in leaf area index

2.3 冠层导度与气象因子

冠层导度和气象因子的关系比较复杂, Lohammar^[12]认为冠层导度与太阳辐射以及水汽压亏缺有显著相关, 并可以用式 $g_c = p_1 \times R_s / (R_s + p_2) / (1 - p_3 \times VPD)$ 来表示; Irannejad^[13] 和 Sommer^[14]增加了土壤水分(θ)和空气温度(T_a)的函数, 冠层导度用式 $g_c = 1 / [g_{cmax} LAI f(VPD) f(T_a) f(R_n) f(\theta)]$ 表达, g_{cmax} 为最大冠层导度, LAI 为叶面积指数。但是, Cienciala 等^[15]在研究 8 月 12 ~ 16 日一种马来西亚刺槐树木液流时发现, 树木液流与气象因子具有强相关性, 冠层导度与气象因子之间没有相关性, 究其原因, 一方面, 作者认为可能是有效的大气紊流数据不够; 另外, 在干旱半干旱地区, 影响冠层导度的因子非常复杂, 从能量分配的角度来研究冠层导度也许会更有效。总之, 近年来, 冠层导度和气象因子关系的研究也越来越受到重视^[16,17]。

表 2 是雨前和雨后不同土壤湿度情况下柠条冠层导度和气象因子的 Pearson 相关系数表。当土壤水分比较高时, 气孔主要受气象因子调控, 冠层导度和太阳辐射以及作物参考蒸腾成正相关, 与温度成反相关, 与饱和水汽压亏缺和相对湿度却无相关关系; 当土壤水分比较低时, 情况恰好相反, 冠层导度与饱和水汽压亏缺成负相关, 与相对湿度成正相关, 而和其它气象因子无相关关系, 这可能是由于植物的生理特性发生了变化, 表现在气孔导度变小, 气孔出现部分关闭, 进而影响水汽交换, 植物蒸腾降低, 冠层温度升高, 受气象因子调控也变小, 而转变为植物的生理调控。在黄土高原干旱半干旱地区, 土壤水分是影响柠条生理因素的关键性因子, 通过气象因子来模拟冠层导度时一定要慎重。

3 结语

(1) 树干液流和太阳辐射、大气温度、作物参考蒸腾和饱和水汽压亏缺成显著正相关, 与相对湿度成负相

关,而与风速无相关性。在晚上,液流通过根压作用,以水分主动进入方式补充白天植物蒸腾失去的植物水分,恢复植物体内的水分平衡。可用太阳辐射的简单表达式来估测柠条树木液流: $Y=0.0561X+5.615$ 。

表2 不同水分条件下冠层导度和气象因子的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient of canopy conductance to climatic factors for different soil water content

冠层导度 Canopy conductivity	太阳辐射 Solar radiation	温度 Temperature	VPD	相对湿度 Relative humidity	ET_0
Gwet(1)	0.318 **	-0.198 **	-0.136	-0.043	0.255 **
Gwet(2)	0.353 **	-0.202 **	-0.041	-0.018	0.209 **
Gwet(3)	0.393 **	-0.245 **	-0.031	-0.051	0.336 **
Gwet(4)	0.371 **	-0.235 **	-0.029	-0.032	0.271 **
Gwet(5)	0.362 *	-0.221 **	-0.033	-0.045	0.257 **
Gwet(6)	0.378 **	-0.218 **	-0.023	-0.055	0.221 **
Garid(1)	-0.083	-0.137	-0.173 *	0.138 *	0.045
Garid(2)	-0.087	-0.117	-0.271 *	0.313 **	0.075
Garid(3)	-0.109	-0.133	-0.158 *	0.181 *	0.051
Garid(4)	-0.078	-0.091	-0.156 *	0.163 *	0.082
Garid(5)	-0.081	-0.072	-0.263 *	0.214 *	0.010
Garid(6)	-0.077	-0.103	-0.286 *	0.193 *	0.077

* 和 ** 分别表示该值在 $P=0.05$ 和 $P=0.01$ 的水平上显著; G_{wet} 和 G_{arid} 分别为湿润和干旱条件下 6 个茎流计探头对应柠条的冠层导度

The values marked * and ** mean they are significant at $P=0.05$ and $P=0.01$, respectively; G_{wet} and G_{arid} are canopy conductivity during wetness and drought for each of 6 probes, respectively

(2) 林分叶面积越大,蒸腾越旺盛,叶面积指数为 2.3 的林分研究期间平均日蒸腾为 $3.64\text{mm d}^{-1}\text{m}^{-2}$,叶面积指数为 1.1 的林分平均日蒸腾 $1.83\text{mm d}^{-1}\text{m}^{-2}$ 。

(3) 柠条冠层导度与气象因子的关系需要进一步研究。本研究中,土壤水分与冠层导度存在非常复杂的关系,在不同土壤水分条件下,气象因子对柠条生理指标的影响程度发生变化。随着土壤水分胁迫程度的增加,冠层导度与太阳辐射、温度、作物参考蒸腾的相关性下降,但与饱和水气压亏缺和相对湿度的相关性却上升。

References:

- [1] Hu J Z, Zhu J Z. Tactics of vegetation restoration and reconstruction for degraded ecosystem in the Loess Plateau. Journal of Beijing Forestry University (Social Sciences), 2005, 4(1): 13—19.
- [2] Guo Z S, Shao M A. Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi-arid regions of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(8): 1640—1647.
- [3] Wu Q S, Yang W Z. Vegetation construction and sustainable development for the Loess Plateau. Beijing: Scientific Press, 1998. 156—188.
- [4] Shen Y C. Consideration and actions for ecology construction in the Loess Plateau. Nature, 2005, 15—19.
- [5] Fu B J, Wang J, Chen L D, Qiu Y. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China. Catena, 2003. 54(1-2), 197—213.
- [6] Guo Z S, Shao M A. Mathematical model for determining vegetation carrying capacity of soil water. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 18(10): 95—99.
- [7] Cienciala E J K, Malmer A. Tree sap flow and stand transpiration of two *Acacia mangium* plantations in Sabah, Borneo. Journal of Hydrology, 2000, 236. 109—120.
- [8] Lemeur K R S, Samson R. Sap flow dynamics of a beech tree during the solar eclipse of 11 August 1999. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 112: 139—149.
- [9] Nicolas E, Torrecillas A, Ortuno M F, Domingo R, Alarcón J J. Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements. Agricultural Water Management, 2005, 72: 131—145.
- [10] Liu F J, Zheng S K, Ju G S. A study on comparison of measuring water-consumption for transpiration in poplar. Scientia Silvae Sinicae, 1997, 32

(2): 117—125.

- [11] Xia J M, Kang S Z, Li Y C, Wang F, Qu Y P. Diurnal and seasonal variation of stem sap flow for *Caragana korshinskii* on the arid desert region in Shiyang river basin of Gansu. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1186—1193
- [12] Lohammar T, Larsson S, Linder S, Falk S. Structure and function of Northern Coniferous forests-an ecosystem study. *Ecological Bulletins*, 1980, 32. 505—523.
- [13] Irannejad P, Shao Y. Description and validation of the atmosphere-land-surface interaction scheme (ALSIS) with HAPEX and Cabauw data. *Global and Planetary Change*, 1998, 19(1-4): 87—114.
- [14] Sommer R, Tatiana D, de Abreu S, Konrad V, Araújo A C D, Fölster H. Transpiration and canopy conductance of secondary vegetation in the eastern Amazon. *Agricultural and Forestry Meteorology*, 2002, 112. 103—121.
- [15] Cienciala E, Kučera J, Malmer A. Tree sap flow and stand transpiration of two *Acacia mangium* plantations in Sabah, Borneo. *Journal of Hydrology*, 2000, 236. 109—120.
- [16] Monteith J L. A reinterpretation of stomatal responses to humidity. *Plant, Cell and Environment*, 1995, 18. 357—364.
- [17] Alves I, Pereira L S. Modeling surface resistance from climatic variables? *Agricultural Water Management*, 2000, 42. 371—385.

参考文献:

- [1] 胡建忠, 朱金兆. 黄土高原退化生态系统的恢复重建方略. *北京林业大学学报(社会科学版)*, 2005, 4(1): 13~19.
- [2] 郭忠升, 邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力. *生态学报*, 2003, 23(8): 1640~1647.
- [3] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与可持续发展. 北京: 科学出版社, 1998. 156~188.
- [4] 申元村. 黄土高原植被生态建设的反思与对策. *大自然*, 2005, 15~19.
- [6] 郭忠升, 邵明安. 土壤水分植被承载力数学模型的初步研究. *水利学报*, 2004, 18(10): 95~99.
- [10] 刘奉觉, 郑世锴, 巨关升. 树木蒸腾耗水测算技术的比较研究. *林业科学*, 1997, 32(2): 117~125.
- [11] 夏佳敏, 康绍忠, 李玉成, 王锋, 屈艳萍. 甘肃石羊河流域干旱荒漠区柠条树干液流的日季变化. *生态学报*, 2006, 26(4): 1186~1193.