

文章编号:1000-694X(2010)05-1108-06

荒漠灌丛树干茎流及其入渗、再分配特征

王正宁^{1,2}, 王新平^{1*}

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 沙坡头沙漠试验研究站, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 运用铝箔收集法测定了荒漠灌木柠条(*Caragana korshinskii* Kom.) 树干茎流; 利用时域反射仪连续测量土壤剖面水分含量, 分析树干茎流影响下柠条根际区水分入渗与再分配过程。结果表明, 柠条灌丛产生树干茎流需要 2.2 mm 的前期降雨量, 树干茎流占降雨量的 7.9%, 平均汇流率是 89.8。土壤表层含水率对降雨过程响应明显; 当降雨量达到 6 mm 时, 树干茎流有利于增加根际区土壤水分增量, 补充深层土壤水分, 对荒漠植被在干旱条件下存活起着重要作用。

关键词: 柠条; 汇流率; 湿润锋; 土壤水分增量

中图分类号: Q945.17 **文献标识码:** A

降水是受水分供应不足制约的干旱区重要的土壤水分补给源^[1]。针对土壤-植被系统水循环过程及其植被调控机理的研究不仅是干旱区生态水文学研究的核心内容, 而且对我国西部生态环境建设实践也具有重要的指导意义^[2]。荒漠生态系统中, 在灌丛干扰下, 降水将以树干茎流和穿透水的方式到达地表, 从而影响降水在植被冠层下入渗、再分配以及水分平衡。树干茎流使水分和养分在植物根部富集, 对于维持植物体内水分平衡, 减缓干旱缺水对植物生长造成的影响和提高水资源的有效利用率具有十分重要的作用^[3]。

在干旱区的早期研究发现, 荒漠植被能够通过叶片、枝干将降水聚集到植物的根部, 增加根系水分, 使植物在干旱条件下得以生存和生长^[4-6], 树干茎流将是灌木在干旱条件下维持生理活性的潜在水分资源^[7]。荒漠灌木能够通过树干茎流收集 5%~10%, 有时可达 20%~40% 的降水, 根际区的根道系统和土壤大孔隙有利于树干茎流的下渗, 将水分贮存在较深的土层中供植物在干旱缺水时利用^[7-11]。

Herwitz^[12]为了定量分析树干茎流作为根际区土壤水分输入, 提出了汇流率(funneling ratio)的概念, 以树干基部单位横截面积上的树干茎流量与降雨量的比值表示, 公式如下:

$$F = \frac{SF}{BA \times P} \quad (1)$$

式中: F 为汇流率; SF 为树干茎流量; BA 表示树干

基部的横截面积(m^2); P 表示单位面积降雨量($mm \cdot m^{-2}$)。 $BA \times P$ 表示用等同于树干横截面积的雨量计在无植被区可以收集到的水量。因此, F 就可以理解为被植株截留的树干茎流量与无植物存在时到达树干横截面积上的降水量的比率。汇流率大于 1 表明除了树干, 植株冠层其他构件均对汇集降水形成树干茎流有贡献^[12-13]。自从 Herwitz 提出了汇流率概念后, 汇流率概念被广泛应用于干旱区树干茎流研究, 结果表明, 汇流率通常大于 10, 有时远大于 10^[9, 14-15]。因此, 在一次降水后, 根际区土壤水分增量将大于同期降水量。

柠条(*Caragana korshinskii* Kom.) 是我国西北荒漠、半荒漠主要优良造林树种^[16], 本研究以人工固沙灌木柠条为研究对象, 在腾格里沙漠东南缘中国科学院沙坡头沙漠试验研究站进行了野外观测试验, 于 2008 年 7 月 1 日到 10 月 31 日期间, 运用铝箔法收集、测定柠条在降雨过程中产生的树干茎流; 同时利用时域反射仪 TDR(Time Domain Reflectometer)连续测量土壤剖面水分含量, 分析树干茎流在柠条群落区入渗与再分配过程, 探讨灌丛树干茎流对干旱区生态恢复与重建的水文学意义。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

中国科学院沙坡头沙漠试验研究站地处宁夏中

收稿日期: 2010-01-27; 改回日期: 2010-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871051); 中国科学院“西部之光”人才培养计划“联合学者”项目资助

作者简介: 王正宁(1979-), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 主要从事干旱区水文与水资源研究。Email: ningwang@bjfu.edu.cn

* 通讯作者: 王新平 (Email: xpwang@lzb.ac.cn)

卫市境内,位于腾格里沙漠东南缘,属草原化荒漠,地理位置位于 $37^{\circ}27' N$, $104^{\circ}57' E$,海拔高度约为1 300 m。格状新月形沙丘由西北向东南倾斜,呈阶梯状分布。受蒙古高压的影响,夏季干燥、春天多风、冬季寒冷,受夏季风尾间影响,秋季略湿,年均降水量仅为191 mm,60%集中在6—9月,降水量变率高达45.7%。应用美国国家气象局标准A级蒸发皿测得年蒸发量在2 400 mm左右,相对湿度平均在40%左右。主风向为西北风,年平均风速 $2.1 m \cdot s^{-1}$ (2 m高度)。年平均气温为 $10^{\circ}C$,低温极值为 $-25.1^{\circ}C$,高温极值为 $38.1^{\circ}C$,全年日照时数为3 264.7 h。土壤类型有风沙土、灰钙土、灰棕荒漠土、草甸土、沼泽土、耕作土等,以风沙土及灰棕荒漠土分布范围最广。风沙土容重 $1.53 \sim 1.60 g \cdot cm^{-3}$,田间持水量6.70%。

1.2 研究方法

在研究区内随机选取8株柠条,由于柠条是多枝干植物,对每株柠条主要树干单独收集树干茎流。在每枝树干基部距地面约10 cm处用细沙纸轻轻打光后用铝箔胶带呈V形缠绕树干一周半,用不干胶填缝,由于铝箔胶带的可塑性较强,在铝箔与树干间形成一个完全环绕树干的水槽,水槽开口大于1 cm,用于拦截树干茎流,然后通过约1.5 cm的软管联通铝箔水槽与集水容器,将树干茎流导入容器内收集起来用量筒测定集水量(图1)。



图1 柠条树干茎流收集方法示意图
Fig. 1 Photographs showing the collection of *C. korshinskii* stemflow

另外选取一株柠条,在距灌丛中心20 cm处开挖一条深2 m的土壤垂直剖面,分别在5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、60、70、80、90、100、120、140、160、180、200 cm深度处,水平插入20 cm长的TDR(Model 6050X1, Trase System I, USA)探头,

共20个,然后回填。观测发现该株柠条根系分布在30 cm及100 cm深度相对集中。试验采用TDR,对降水过程中及降水结束以后土壤水分在土壤剖面上入渗与再分配过程进行实地观测。TDR的观测精度 $\leq \pm 2.0\%$ (vol.),测量范围0~100%,分辨率 $\leq 0.1\%$ 。湿润锋位置可以通过测定土壤剖面基质势或水分含量的变化来确定^[17]。因此,利用TDR测定土壤剖面含水率,通过分析不同深度土壤水分动态变化来确定土壤水分入渗湿润锋。

根据TDR测试探头位置,假定对应于每一深度处TDR测试探头所测得土壤体积含水率值代表一定剖面深度上土壤水分平均值,根据水量平衡原理,累积入渗量 I 为:

$$I = 10(\theta_e - \theta_i)Z_f \quad (2)$$

式中: θ_e 为末期体积含水率; θ_i 为初始体积含水率; Z_f 为土层深度(cm); I 为累积入渗量(mm)。土壤水分增量为不同剖面深度累积入渗量之和,即

$$\Delta S = \sum I_d \quad (3)$$

式中: ΔS 为土壤水分增量(mm); I_d 为不同剖面深度的累积入渗量(mm)。

次降雨量、降雨强度利用安装在试验点附近的自记雨量计(Adolf Thies GMVH & Co. KG, Germany)进行测定,每10 min记录一次,观测精度 ≤ 0.1 mm。同时记录观测植株的株高、冠幅、分枝数、地径等特征参数。

2 结果与分析

2.1 研究时段内的降雨状况

试验观测期间总降雨量为116.8 mm。以全部观测植株均产生树干茎流为标准,有16次降雨形成树干茎流,其中9月22日数据不可用,9月25日至26日两次降雨间歇期在晚间,视为一次降雨,共收集到14次树干茎流,降雨总量为84.5 mm,占观测期间总降雨量的75.2%。次降雨量最小值1.8 mm,最大值21.6 mm。降雨强度(图2)分析表明,最大10 min降雨强度(I_{10})为 $33 mm \cdot h^{-1}$,在次降雨过程中 I_{10} 波动明显,且大部分 $I_{10} \leq 0.6 mm \cdot h^{-1}$ 。

2.2 树干茎流特征

以单位冠幅面积上树干茎流深表示,柠条树干茎流量随降雨量呈直线增长关系(图3)。树干茎流

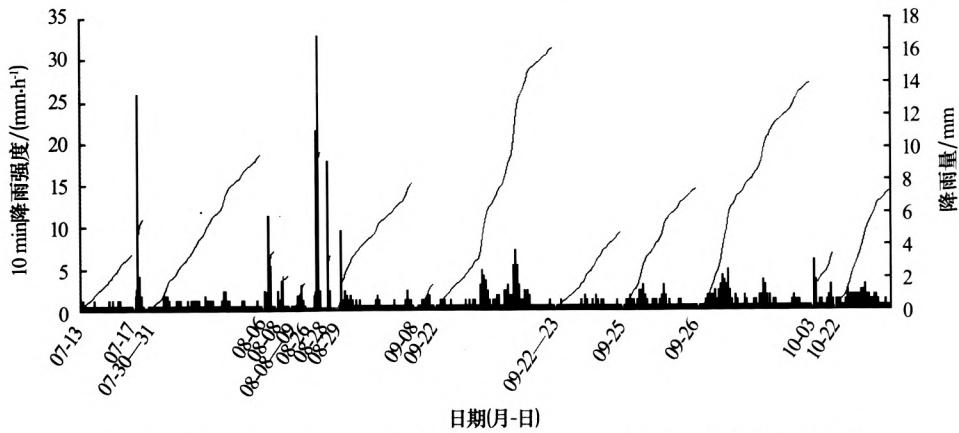


图2 降雨过程中10 min降雨强度($I_{10} \geq 0.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)变化和累积降雨量

Fig. 2 The variation of ten-minute rainfall intensity I_{10} ($I_{10} \geq 0.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) and cumulative precipitation of the rainfall events

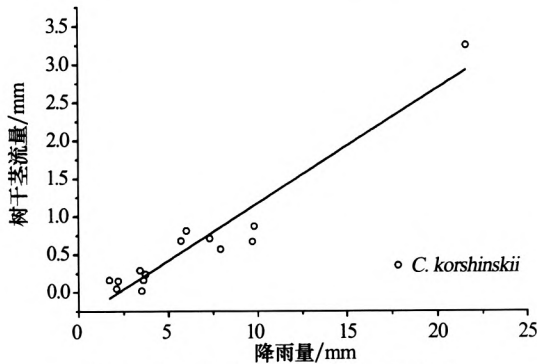


图3 柠条树干茎流量与降雨量关系

Fig. 3 The relationship between *C. korshinskii* stemflow and rainfall

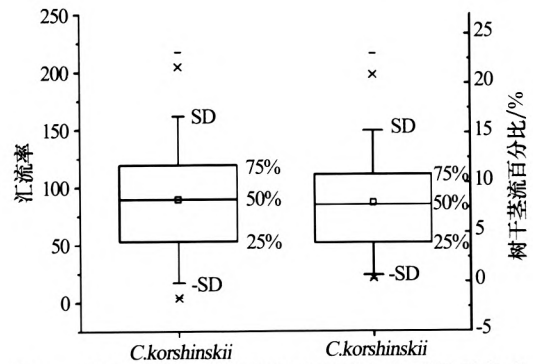


图4 柠条树干汇流率及树干茎流占降雨量百分比

Fig. 4 *C. korshinskii* funneling ratio and stemflow percentage of rainfall

量与降雨量的相关关系如下:

$$SF_C = 0.151P_G - 0.3346$$

$$(R^2 = 0.91342, P < 0.001) \quad (4)$$

式中: P_G 为次降雨量 (mm); SF_C 为树干茎流量 (mm); R 为相关系数。

通过(4)式可以推算出,当次降雨量大于2.2 mm时,柠条将产生树干茎流。实际观测发现,产生树干茎流的降雨量阈值是1.8 mm。柠条平均树干茎流量占降雨量的7.9%,变幅标准差为4.9%。汇流率在6.4~168.5之间变化,平均值为89.8(图4)。

当次降雨量低于6 mm时,汇流率在低值区域60左右波动,高于6 mm时,汇流率在高值区域120左右波动;而当平均降雨强度低于约 $6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,汇流率波动明显,随着降雨强度的增大,汇流率趋于稳定(图5)。

2.3 土壤剖面入渗湿润锋动态

选取8月28日20:00—9月7日20:00(图6)以及9月22日17:00—10月7日17:00(图7)两个

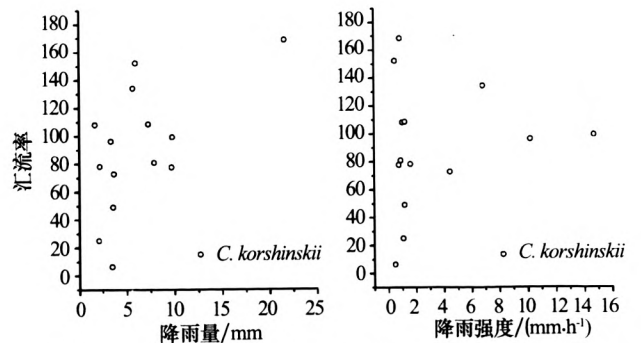


图5 柠条树干汇流率与降雨量以及降雨强度的关系

Fig. 5 The relationship between *C. korshinskii* funneling ratio and rainfall and rainfall intensity

时间段的土壤含水率随时间推移的变化过程进行分析。剖面上湿润锋的传递明显地具有非同步性,随着剖面深度的不断增加,湿润锋传递时间明显滞后;在30 cm以下剖面这一趋势更加明显,湿润锋传递过程更趋于缓慢。表层0~10 cm深度范围内,土壤含水率增加与降雨具有较高地同步性,并且对降雨过程的响应明显,土壤含水率随降雨出现快速增加,伴随降雨的结束又迅速下降。当表层土壤含水率较

高时,土壤含水率随降雨强度的不断变化而呈现波动趋势,在 96 h 处表现尤其明显(图 7)。而深层土壤含水率受降雨量影响明显,8 月 28 日 14:00—8 月 29 日 07:00 累积降雨 11.3 mm,土壤湿润锋传递至 40 cm 深;9 月 22 日 00:00—9 月 26 日 21:00 累

积降雨 42.5 mm,土壤湿润锋传递深度达 90 cm 深;浅层土壤含水率较高时,连续降雨更有利于水方向深层补充(图 7);同时相对于表层土壤剖面,在降雨结束后,较深层土壤剖面(30 cm 以下)含水率降低速度明显变缓。

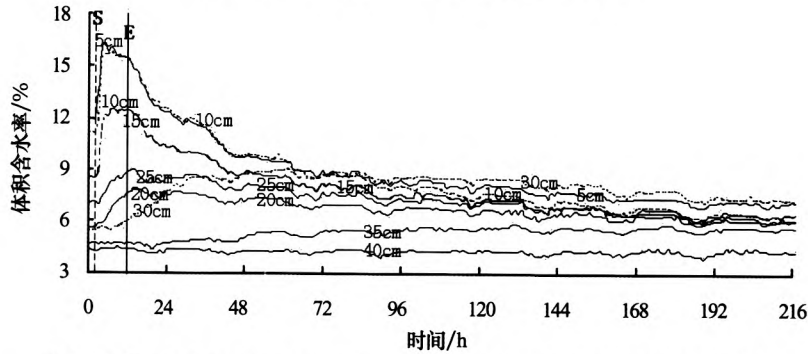


图 6 8 月 28 日 20:00—9 月 7 日 20:00 土壤剖面湿润锋随时间迁移过程 (S 表示降水的开始,E 表示降水的结束)

Fig. 6 The advancement of wetting fronts under rainfall events from 20:00, 28 Aug. to 20:00, 7 Sep.

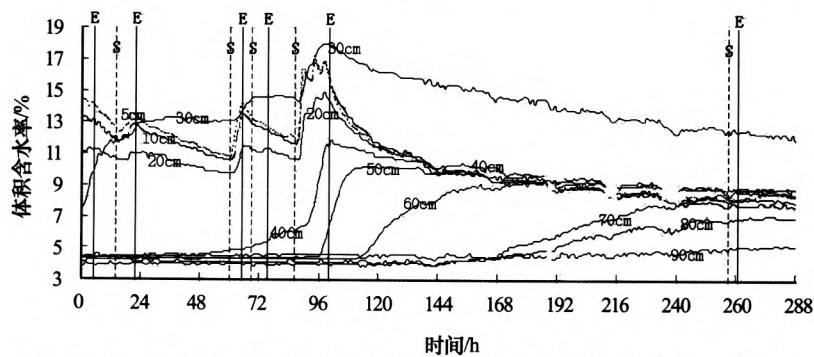


图 7 9 月 22 日 17:00—10 月 7 日 17:00 土壤剖面湿润锋随时间迁移过程 (S 表示次降水的开始,E 表示降水的结束)

Fig. 7 The advancement of wetting fronts under rainfall events from 17:00, 22 Sep. to 17:00, 7 Oct.

2.4 降水过程中土壤水分增量变化

由(4)式推算知,柠条树干茎流的形成需要 2.2 mm 降雨量,当降雨量在阈值上下波动时,初期降雨主要用于湿润柠条植冠,降雨不能全部形成茎流补充根区土壤水分,因此在图 7 中 72 h($P=1.5$ mm)和 264 h($P=3.5$ mm)左右,植株下表层土壤含水率基本不受降雨影响。降雨量较小时,土壤水分增量几乎为零,即使有茎流产生,对土壤表层水分几乎没有补给作用;但当一次降雨前有充足的降雨且两次降雨间隔时间较短时,如 9 月 23 日,植株个体得以充分地湿润,即使较小降雨量可以有效地形成树干茎流,并补充表层土壤水分。中等降雨量(>6 mm)条件下,可以有效地形成树干茎流,土壤水分增量明显,随着降雨量增加,植株树干茎流的汇流作

用加强,因此,土壤水分增量远大于同期降雨量。

3 讨论与结论

树干茎流的形成需要一定的前期降雨量^[9,10,15,18],柠条树干茎流的形成需要 2.2 mm 的前期降雨;树干茎流占可产生茎流降雨量的 7.9%,其平均汇流率为 89.8。在降雨量达到一定值时(约 10 mm),由于树干茎流的形成,根际区土壤水分增量将大于同期降雨量。

汇流率在不同降雨量、不同降雨强度下变化明显(图 5),在小降雨量事件中,低强度降雨将有很大部分被植株个体截留蒸发掉,不利于茎流形成;树干茎流易于沿枝干下面形成的优先流通道向树干基部输送,因此,高强度的降雨可以在部分植株个体仍然处于干燥状态时,将植株冠层截持的降雨快速形成

树干茎流^[19],从而使得树干茎流量增加;在大降雨事件中,低强度降雨时虽然仍然有部分降雨被植株个体截留蒸发掉,但随着降雨量的增加,将削弱这部分降雨在总雨量中所占的比例,同时,由于枝干表面水吸持力一定,高强度的降雨将增加茎流在传输过程中以穿透水形式滴落的可能性^[20],因而降雨量达到一定值时汇流率会维持在一定的范围内。

依据汇流率来看,在降雨达到植株形成所需前期降水量后,到达树干基部的茎流将达到同期降雨的几十甚至上百倍,这部分茎流将使表层土壤含水率迅速增加,从而与下层土壤剖面形成更大的水势梯度,加速土壤水分向深层入渗(图6),同时柠条的粗根主要分布于0~60 cm^[21],由于存在根道优先流,也可能加速树干茎流向土壤深层的补给速度,8月28日14:00—8月29日07:00累积降雨11.3 mm,土壤湿润锋传递深度至40 cm深;9月22日00:00—9月26日21:00累积降雨42.5 mm,土壤湿润锋传递深度达90 cm深;同时,浅层土壤含水率较高时,较小间隔的持续降雨也更有利于水分向深层补充。秦耀东^[22]发现,渗入土壤较深的水分比较容易保持,对于非膨胀性(非裂隙)土壤,大约渗入到25 cm以下的水,已经不大可能由蒸发损失掉了。因此,由于树干茎流的影响,将有利于降雨在根际区的贮存,减小表面蒸发损失;同时人工植被建立后降水入渗呈现浅层化趋势^[23-25],树干茎流的存在将有助于缓解根际区降水入渗的浅层化问题。

依据土壤水分增量来看,当降雨量较大时(约10 mm),土壤水分增量将远大于同期降雨量,而降雨量小于一定值时,树干茎流并不能充分地增加土壤水分增量,甚至当降雨量较小时,土壤水分增量为零。土壤水分增量的变化依赖于降雨量的变化。根据已有研究结果,对于沙丘土壤水分补给而言,本区次降水量 $>8 \text{ mm}$ ^[26],降水强度 $>0.46 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[27]的降水属于有效降水,但对于根际区而言,当降水量在6 mm左右时,降水就可以有效补给根际区土壤水分。

在本研究区,降雨多以小雨量降雨为主,加之较高的土壤蒸发,如果仅仅以汇流率来论述树干茎流对于草原化荒漠区灌丛根际区的补给作用,将有可能过高估计树干茎流在草原化荒漠区的生态水文学意义。

参考文献(References):

- [1] 王新平,康尔酒,张景光,等. 荒漠地区主要固沙灌木的降水截留特征[J]. 冰川冻土,2004,1(26):89-94.
- [2] 李新荣,张志山,王新平,等. 干旱区土壤-植被系统恢复的生态水文学研究进展[J]. 中国沙漠,2009,29(5):843-852.
- [3] 周择福,张光灿,刘霞,等. 树干茎流研究方法及其评述[J]. 水土保持学报,2004,18(3):137-140.
- [4] Glover J, Gwynne M D. Light rainfall and plant survival in East Africa. II. Dry grassland vegetation[J]. Journal of Ecology, 1962,36:199-206.
- [5] Slatyer R O. Measurement of precipitation, interception by an arid plant community (*Acacia aneura* F. Muell.) [J]. Arid Zone Research, 1965,25:181-192.
- [6] Specht R L. Dark island heat (Ninety Miles Plain, South Australia) IV: Soil moisture patterns produced by rainfall interception and stemflow[J]. Australian Journal of Botany, 1957, 5:137-150.
- [7] Martinez-Meza E, Whitford W G. Stemflow, throughfall and channelization of stemflow by roots in three Chihuahuan desert shrubs[J]. Journal of Arid Environments, 1996,32:271-287.
- [8] Navar J, Bryan R B. Interception loss and rainfall redistribution by three semi-arid growing shrubs in northeastern Mexico [J]. Journal of Hydrology, 1990,115:51-63.
- [9] Navar J. The causes of stemflow variation in three semi-arid growing species of northeastern Mexico [J]. Journal of Hydrology, 1993,145:175-190.
- [10] Mauchamp A, Janeau J L. Water funneling by the crown of *Flourensia cernua*, a Chihuahuan Desert shrub [J]. Journal of Arid Environments, 1993,25:299-306.
- [11] Whitford W G, Anderson J, Rice P M. Stemflow contribution to the "fertile island" effect in creosotebush, *Larrea tridentate* [J]. Journal of Arid Environments, 1997,35:271-287.
- [12] Herwitz S R. Infiltration-excess caused by stemflow in a cyclone-prone tropical rainforest [J]. Earth surface Processes and Landforms, 1987,11:401-412.
- [13] Carlyle-Moses D E, Price A G. Growing-season stemflow production within a deciduous forest of southern Ontario [J]. Hydrological Processes, 2006,20:3651-3663.
- [14] Carlyle-Moses D E. Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 58: 181-202.
- [15] Li X Y, Liu L Y, Gao S Y, et al. Stemflow in three shrubs and its effect on soil water enhancement in semiarid loess region of China [J]. Agricultural and forest meteorology, 2008, 148: 1501-1507.
- [16] 陈应武,李新荣,张景光,等. 昆虫寄生对柠条种子命运的影响 [J]. 中国沙漠,2006,26(6):1015-1019.
- [17] Noborio K, McInnes K J, Heilman J L. Measurements of cumulative infiltration and wetting front location by time domain reflectometry [J]. Soil Science, 1996,161(8):480-483.
- [18] Enright, N J. Stemflow as a nutrient source for nikau palm (*Rhopalostylis sapida*) in a New Zealand forest [J]. Austral-

- ian Journal of Ecology, 1987, 12, 17-24.
- [19] Herwitz S R. Raindrop impact and water flow on the vegetative surfaces of trees and the effects on stemflow and throughfall generation[J]. Earth surface Processes and Landforms, 1987, 12, 425-432.
- [20] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate[J]. Hydrological Processes, 2000, 14 (16-17): 2903-2920.
- [21] 张志山, 樊恒文, 赵金龙, 等. 沙漠人工植物群落的根系分布及动态[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 637-643.
- [22] 秦耀东. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003, 97-124.
- [23] Li X R, Wang X P, Li T, et al. Microbiotic soil crust and its effect on vegetation and habitat on artificially stabilized desert dunes in Tegger Desert, north China[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(3): 147-154.
- [24] 潘颜霞, 王新平. 荒漠人工植被区浅层土壤水分空间变化特征分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 250-256.
- [25] 潘颜霞, 王新平, 苏延桂, 等. 荒漠人工固沙植被区浅层土壤水分动态的时间稳定性特征[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 81-86.
- [26] 陈文瑞. 沙坡头地段铁路两侧 29 年人工植被区的水量平衡[M]//中国科学院沙坡头沙漠试验研究站编著. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究(二). 银川: 宁夏人民出版社, 1991, 66-75.
- [27] 王新平, 李新荣, 康尔酒, 等. 腾格里沙漠东南缘人工植被区降水入渗与再分配规律研究[J]. 生态学报, 2003, 6(23): 1234-1241.

Stemflow of *Caragana korshinskii* and its Infiltration and Redistribution in Desert Environment

WANG Zheng-ning^{1,2}, WANG Xin-ping¹

(1. Shapotou Desert Experimental Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Stemflow is important in sustaining the stabilization of desert ecosystems, where precipitation is the critical source of water replenishment. Stemflow of *Caragana korshinskii*, a kind of xerophytic shrub, was collected by aluminum foil collar at the re-vegetated sand dunes in the Shapotou desert ecosystem of the northwestern China. The 20 probes of Time Domain Reflectometry (TDR) were inserted horizontally into the soil profile near *C. korshinskii* root at different depths to record volumetric soil moisture by hourly intervals. Stemflow of *C. korshinskii*, expressed as an equivalent water depth per unit projected crown area, was averaged by 7.9% of the gross precipitation and the average funnelling ratio was 89.8. Amount of 2.2 mm precipitation was necessary for the generation of the stemflow of *C. korshinskii*. The surface soil moisture was strongly correlated with individual rainfall. Stemflow was helpful to increase the soil moisture increment around the root area and replenish the deeper soil layers moisture only when rainfall reached 6 mm. The water infiltrated to the deeper soil layer played an important role in plant surviving in the arid environment.

Keywords: *Caragana korshinskii*; funnelling ratio; wetting front; soil moisture increment