科学通报 2008 年 第 53 卷 第 8 期: 939 ~ 945
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

毛乌素沙地固沙灌木树干茎流特征

杨志鹏[①②], 李小雁[①②], 刘连友[①], 武建军[③*], 哈斯[①②], 孙永亮[②]

① 地表过程与资源生态国家重点实验室(北京师范大学), 北京 100875;
② 北京师范大学资源学院土地资源研究所, 北京 100875;
③ 民政部教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875
* 联系人, E-mail: wujj@ires.cn

2007-11-29 收稿; 2008-01-24 接受
国家自然科学基金(批准号: 40571023)、全国优秀博士学位论文作者专项资金(批准号: 200426)和科技部科技支撑项目(批准号: 2006BAD26B07)资助

摘要 通过对毛乌素沙地固沙灌木沙柳和籽蒿树干茎流的野外实验观测, 分析了冠层和降雨特征参数对树干茎流形成的影响, 确定了树干茎流量在降雨再分配中的比例. 结果表明: 沙柳和籽蒿的累计树干茎流量分别占降雨总量的 7.6%和 2.7%. 树干茎流量和降雨量之间存在显著线性正相关; 茎流百分数随降雨量的增加呈指数增长趋势. 在较小降雨量时, 茎流百分数随降雨量的增加较快. 超过一定降雨量范围时(沙柳 3~5 mm, 籽蒿 5~7 mm), 茎流百分数开始接近稳定. 通过逐步回归分析表明, 分枝较多, 树冠体积较大, 分枝与地面夹角较小的冠层结构有利于灌木树干茎流的形成. 树干茎流量、茎流百分数随最大 10 min 雨强(I_{10})均呈指数增长趋势. 其中, 沙柳和籽蒿的茎流百分数分别在 I_{10}<3.0 mm · h^{-1} 和 I_{10}<2.0 mm · h^{-1} 降雨条件下随雨强的增加较快, 之后出现稳定的趋势.

关键词
毛乌素沙地
沙柳
籽蒿
树干茎流

树干茎流是指树冠截留的降雨经叶片和树枝沿树干流向地面的雨水 [1], 它能够改变降水的空间分布格局, 影响水分和养分循环的速度和方向, 对树木的生长起着很重要的作用 [2]. 特别在干旱和半干旱地区, 树干茎流可使水分和养分在植物根部富集, 对于维持树木体内水分平衡, 减缓干旱缺水对树木生长造成的影响和提高降水资源的有效利用率具有十分重要的作用 [1], 它可能是荒漠耐旱灌木适应干旱瘠薄立地条件的重要生态水文机理之一.

树干茎流的科学研究主要集中在热带、亚热带和暖温带森林水文学方面, 着重研究树干茎流对水循环、地下水补给、营养元素和污染物质运移的影响等[3~9], 干旱、半干旱区的树干茎流研究相对较少. 在二十世纪五、六十年代, Spechit[10], Glover等人 [11]和Slatyer[12]等人发现荒漠植被能够通过叶片、茎干将雨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, 具有重要的生态意义. 二十世纪八、九十年代以来美国和墨西哥科学家对干旱荒漠地区部分灌木的自然集水特征及其对植物根部土壤水分和营养元素的补给开始进行较为系统的研究[13~18]. 这些研究表明荒漠灌木能够通过树干茎流收集 5%~10%(有时可达到 20%~40%)的降水并直接运送到植物根部, 根部的根系管道和土壤孔隙有利于雨水的下渗, 能将水分贮存在较深的土层中供植物在干旱缺水时利用; 据估算, 根部接收的雨水是年降雨量的 15~18 倍, 比根部周围地方多 5 倍 [19]. 澳大利亚桉树的树干茎流在根部最多能够渗入到地表以下 28 m深处 [20]. 目前, 国外正在开展在多种灌木类型的树干茎流观测和模型研究 [21]. 国内对干旱半干旱区灌木树干茎流的生态水文功能有所认识, 但实验研究较少, 对于不同灌木的的树干茎流产生条件、影响因素、树干茎流量与雨水特征关系等问题还不明确, 因此有必要加强此方面的研究.

沙柳(*Salix psammophila* C. Wang et Chang Y. Yang)和籽蒿(*Artemisia sphaerocephala* Krasch)广泛分布于毛乌素沙地, 对干旱缺水、风蚀沙埋等恶劣条

件有很强的适应能力，现已大量应用于固沙林地的建设[22,23]，对当地的植被恢复具有重要意义[24]. 本研究以上述树种为研究对象，通过野外实验观测，分析降雨特性与灌木树干茎流的相互关系，揭示灌木树干茎流的形成特征及变化规律，为提高干旱区植被雨水利用效率和植被恢复提供理论依据[25].

1 材料与方法

1.1 研究区概况

实验于2006年5~10月在北京师范大学陕西靖边风沙科学实验站进行(图 1). 实验站位于陕西省榆林地区靖边县北部(108°50′E, 37°38′N)，属毛乌素沙地南缘，鄂尔多斯高原向陕北黄土高原的过渡地区，海拔 1350 m.

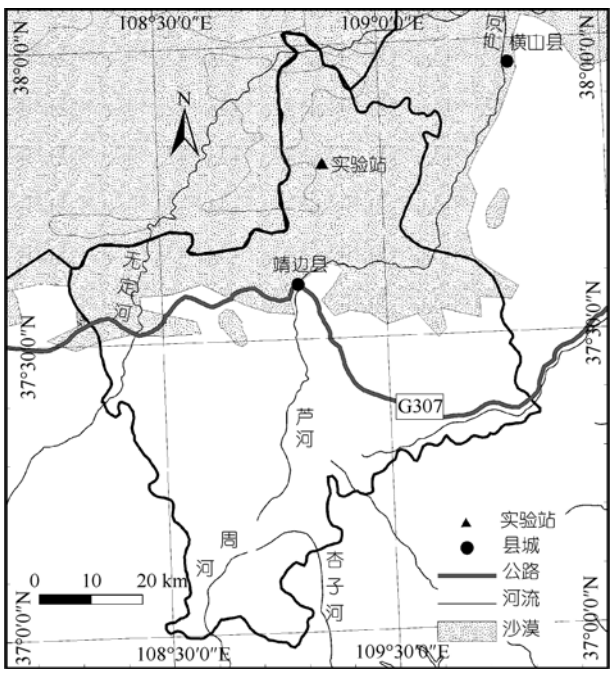


图 1 实验站地理位置图

本区属温带季风半干旱气候，多年平均降水量 395 mm，主要集中在夏季[26,27]，降水变率大，最大降水量达 745 mm(1964 年)，最小降水量仅 205 mm (1965 年)，多年平均蒸发量 2485 mm，为年平均降水量的 6.3 倍，多年平均干燥指数 2.3[28,29].

研究区处在暖温性草原带，是荒漠、荒漠草原向森林草原的过渡带；固定和半固定沙丘上生长着大量的沙生植物，构成了优势种沙生植被，有油蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.)、沙米(*Agriophyllum squarrosum* (Linn.) Moq.)、软毛虫实(*Corispermum puberulum* Iljin)、沙竹(*Psammochloa villosa* (Trin.) Bor)等；在固定沙丘上常出现一定数量的草原植物种，如短花针茅(*Stipa breviflora* Griseb.)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng)、草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides* Pall.)等[29]. 区内土壤成土母质为风成沙、黄土和湖积物，主要土壤类型有流动风沙土、固定风沙土和草甸土[30].

1.2 实验设计与数据处理

在实验站的人工植被恢复区选取种植 5 a以上的成熟籽蒿和沙柳各 7 株. 借鉴国内外比较成熟的树干茎流收集方法[18,31]，针对灌木树冠特点，利用塑料漏斗进行树干茎流收集. 具体操作是将塑料漏斗从侧面剖开，并固定在树干接近地表部分，缝隙用橡皮泥和硅胶双重密封，防止渗漏. 漏斗的敞口用防水胶布粘贴，防止雨水从漏斗上部进入. 漏斗下部安装塑料集水瓶. 每次降雨后，用量筒测定集水量，得到体积树干茎流量(mL). 用体积树干茎流量(mL)除以灌木的投影面积得到以毫米单位表示的树干茎流量[32]. 降雨量、雨强及降雨历时利用自记雨量计(RG1, Delta-T, Cambridge, UK)测定，同时用标准雨量器(直径 20 cm)进行雨量订正.

实验期间同时测定了对树干茎流形成产生影响的植物冠层特征参数，包括株高、冠幅、枝下高、分枝数、地径等指标[33]，通过直接测量得到. 考虑到实验周期较长，各项参数在每月中旬测定一次，用来代表当月的冠层结构特征. 选取了投影面积、株高、枝下高、分枝数、地径、分枝倾角、树冠体积共七项指标进行分析比较(其中投影面积和林冠体积通过冠幅计算得到). 实验数据的统计分析使用软件SPSS13.0 (SPSS Inc, Chicago, USA)完成，统计检验的概率显著度水平为$P = 0.05$.

2 结果与分析

2.1 降雨特征

实验期间共观测到降雨 24 次，总降雨量为 173 mm. 次降雨量的最小值为 1.1 mm，最大值为 33.9 mm. 其中 3.0~5.9 mm 降雨事件的出现频率占到 33%，其次是 1.0~2.9 和 6.0~9.9 mm 两个量级的降雨，分别为 29%和 21%，10.0~29.9 mm 和大于 30.0 的降雨出现次数较少，均为 8%. 从雨量分配来看，1.0~2.9，3.0~5.9，6.0~9.9，10.0~29.9 mm 和>30.0 五个量级的降雨

量分别为 14.5, 30.1, 37.0, 25.1, 66.3 mm, 占总降雨量的百分数为 8%, 17%, 21%, 15%和 38%. 从以上结果可以看出, 量级>30.0 mm 的降雨次数只占全部降雨次数的 8%, 但其降雨量占总降雨量的 38%, 对总降雨量的影响较大. 平均降雨强度的分析表明: 最小雨强为 0.2 $mm\cdot h^{-1}$, 最大雨强为 10.2 $mm\cdot h^{-1}$. 其中雨强在 0.2~1.0 $mm\cdot h^{-1}$ 的降雨占总降水次数的 54%, 1.1~2.0, 2.1~3.0, 3.1~10.0 $mm\cdot h^{-1}$ 的降雨占总降水次数的百分数分别为 21%, 8%和 13%, 大于 10.0 $mm\cdot h^{-1}$ 的降雨仅出现 1 次, 占总降水次数的 4%. 整体来看, 观测期间以雨量小于 6.0 mm, 雨强小于 2.0 $mm\cdot h^{-1}$ 的降雨出现次数居多.

2.2 冠层特征对树干茎流的影响

冠层结构特征指标与单株树干茎流量(单位: mL)相关性分析的结果列于表 1. 不同种灌木的冠层结构指标和树干茎流量之间具有类似的相关性特征: 沙柳和籽蒿的树干茎流量大小与分枝数、树冠体积、以及投影面积有较高的正相关系数, 而与枝下高、地径和分枝倾角均成负相关.

表 1 样本植株冠层结构特征指标及其与树干茎流量的相关系数 a)

测量指标	平均值		相关系数	
	沙柳	籽蒿	沙柳	籽蒿
投影面积/m^2	1.17	1.62	0.73	0.99
株高/m	2.04	0.84	0.59	0.60
枝下高/cm	10.3	4.6	−0.46	−0.57
分枝数	7	8	0.82	0.94
地径/cm	3.5	3.1	−0.31	−0.55
分枝倾角/(°)	51.0	36.2	−0.49	−0.06
树冠体积/m^3	2.98	1.43	0.78	0.96

a) 表中各相关系数均通过 95%相关检验的置信区间

根据Aboala等人 [32]的方法, 对单株的茎流总量与投影面积、株高、枝下高、分枝数、地径、分枝倾角、树冠体积进行了逐步回归分析, 得到包含 3 个自变量的多元回归模型(1):

$$SF_{vol} = 12944.812+718.999X_1-131.186X_2+1046.196X_3,\quad R^2 = 0.76,\ n = 14,\ SEE = 903.704,\ Sig. = 0.013 \qquad (1)$$

其中: SF_{vol} 为树干茎流量(mL), X_1 为分枝数, X_2 为分枝倾角(°), X_3 为树冠体积(m^3), SEE 为回归方程的标准误差, Sig.为方程的概率显著性水平. 由此方程可知, 分枝较多, 树冠体积较大, 分枝与地面夹角较小的冠层结构有利于灌木树干茎流的形成.

2.3 降雨特征对树干茎流的影响

(ⅰ) 降雨量的影响. 观测期间, 沙柳树干茎流量累计为 13.2 mm, 占降雨总量的 7.6%; 籽蒿的累计树干茎流量为 4.6 mm, 占降雨总量 2.7%. 以次降雨来看, 沙柳树干茎流量的变化范围在 0.01~2.1 mm 之间, 占次降雨量的 0.9%~6.3%; 平均为(0.5±0.5) mm, 占次降雨量的 6.4%±1.7%. 籽蒿树干茎流量的变化范围在 0.002~0.9 mm 之间, 占次降雨量的 0.2%~3.4%; 平均为(0.2±0.2) mm, 占次降雨量的 2.8%±1.2%.

通过回归分析和曲线拟合, 籽蒿和沙柳的树干茎流量、茎流百分数随降雨量的变化关系见图 2. 树干茎流量和降雨量之间呈显著线性正相关(显著性水平为 $P<0.0001$); 茎流百分数随降雨量的变化呈指数增长趋势(显著性水平为 $P<0.01$). 当降雨量较小时, 茎流百分数随雨量的增加较快. 超过一定雨量范围时, 茎流百分数趋向于稳定, 曲线逐渐平缓. 从图中来看, 籽蒿和沙柳的茎流百分数分别在降雨量为 5~7 和 3~5 mm 的降雨量范围内开始接近稳定, 以回归模型的渐近线推断得到籽蒿茎流百分数的理论最大值为 4.0%, 沙柳茎流百分数的理论最大值为 6.9%.

在 1.0~2.9, 3.0~5.9, 6.0~9.9, 10.0~29.9 mm 和 >30.0 mm 五个降雨量级下, 沙柳的茎流百分数分别为 5.1%, 6.6%, 7.2%, 7.1%, 5.9%, 籽蒿的茎流百分数分别为 1.8%, 2.3%, 3.5%, 4.1%, 3.7%, 均呈现出先增加后减少的趋势(图 3). 从图 3 中可以看到, 沙柳的茎流百分数明显高于籽蒿, 两者的变化趋势差异显著(显著性水平为 $P = 0.001$). 此外, 沙柳的平均茎流百分数在 6.0~9.9 mm 降雨范围内达到最大, 为 7.2%, 而籽蒿平均茎流百分数在 10.0~29.9 mm 降雨范围内达到最大, 为 4.1%.

从以上结果对照实际观测来看, 相对于籽蒿, 沙柳的树皮更加光滑, 枝条分叉较少, 从而更有利于在较小的降雨量下形成更多的树干茎流, 在较小的降雨量下即可达到使枝条、叶片饱和所需的水量 [34], 因此, 两者的茎流百分数最大值分别在不同的降雨量级内出现.

(ⅱ) 雨强的影响. 实验期间的降雨以历时较短的阵雨为主, 降雨过程中雨量分配并不均匀, 因此平均雨强不能很好地反映实际的降雨强度, 树干茎流量与平均雨强相关性较差. 本文选取次降雨的最大 10 min 雨强(I_{10})与树干茎流量进行分析, 得到曲线拟

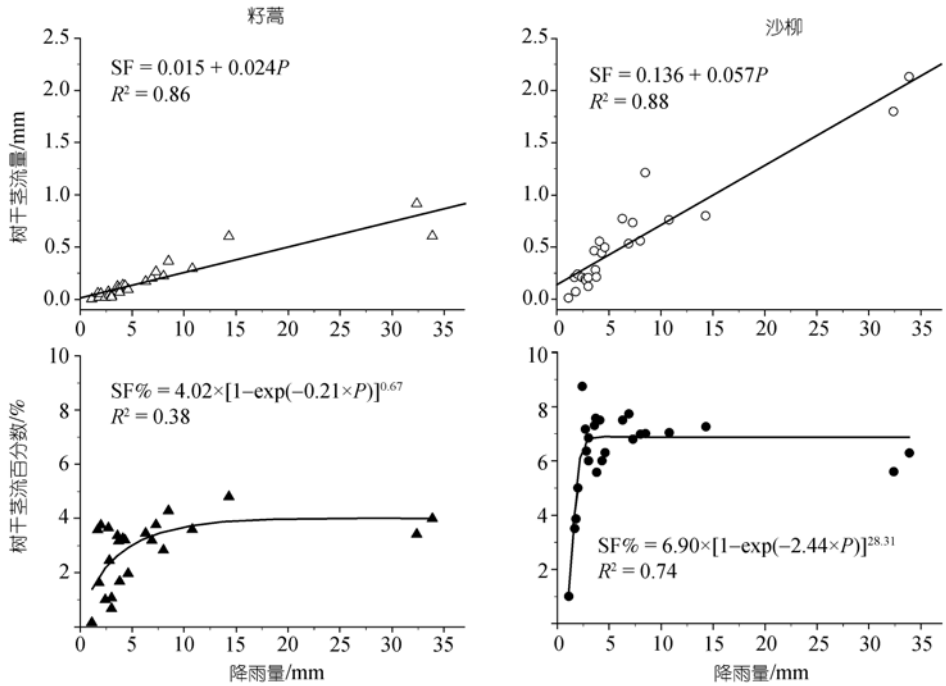


图 2 降雨量 *P* 与树干茎流量 SF、茎流百分数 SF%的回归关系

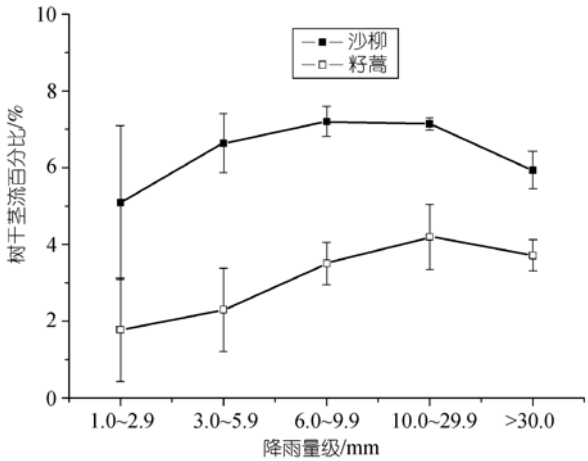


图 3 降雨量级与茎流百分数的变化关系

图中数值为平均值±标准误差

合的的结果见图 4. 从图 4 中可以看到, 沙柳和籽蒿的树干茎流量、茎流百分数随最大 10 min 雨强均呈指数增长趋势. 其中, 籽蒿和沙柳的茎流百分数分别在 I_{10}>2.0 mm·h^{-1} 和 I_{10}>3.0 mm·h^{-1} 后开始出现平缓的趋势, 可见在较小的雨强下茎流的增加较快, 当达到一定雨强以后, 茎流百分数趋向于稳定. 由回归方程得到籽蒿和沙柳的茎流百分数理论最大值分别为 4.0%和 7.0%(显著性水平为 P<0.05).

3 结论与讨论

本文通过野外观测, 对自然降雨条件下毛乌素沙地两种主要人工种植灌木的树干茎流形成及变化特征进行了初步研究, 结果表明:

沙柳和籽蒿树干茎流的形成受植株大小、冠层复杂程度影响, 相关性分析表明其与分枝数、树冠体积、株高以及投影面积呈正相关, 而与枝下高、地径和分枝倾角均呈负相关. 由分枝数、分枝倾角、树冠体积 3 个自变量组成的多元回归模型可以解释 76%的茎流变化量(R^2 = 0.76), 方程具有较高的拟和精度. 类似的结论也见于其他地区的研究结果中 [17,35,36]. Martinez-Meza[33]通过对美国新墨西哥州南部吉娃娃荒漠灌木群落进行的观测表明, 影响树干茎流量的因素有冠幅面积, 株高、树冠体积、分枝倾角和茎干长度, 而对于同种灌木, 只有 1~2 种因素起到关键作用; 并通过对比冬夏两季的树干茎流量, 得到灌木的叶片对树干茎流形成影响并不显著的结论 [33]. 以上结果表明, 尽管影响茎流形成的冠层结构因素很多, 如冠幅、叶片、茎粗、株高、树枝倾角、树皮光滑度、枝下高和地径等, 但在同样的环境下, 影响灌木茎流的主要因素取决于枝条状况, 而植株形态的大小对于荒漠灌木生长有着重要影响, 甚至较小体积的灌

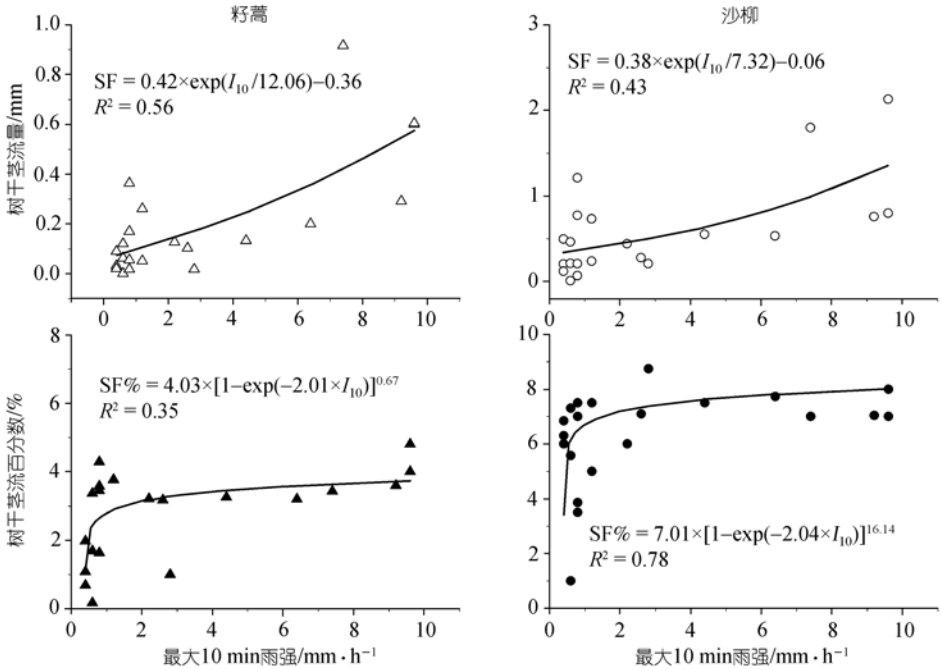


图 4　最大 10 min 雨强 I_{10} 与树干茎流量 SF、茎流百分数 SF%的回归关系

木直接限制了外界水分和养分的有效补给 [12]; 对同种灌木而言, 其植株成熟、冠幅变大与沃岛(island of fertility)的发育密切联系, 从而可以更好地适应外部环境的变化 [33].

表 2 列出了不同地区几种灌木(或群落)的树干茎流百分数, 可见, 大多数干旱半干旱地区灌木的树干茎流范围在 2%~10%之间. 在不同的研究区域, 随着降雨量的增加, 茎流百分数有增大的趋势. 尽管不同生态系统类型下的茎流变化范围很大, 甚至同种植物在不同地区的树干茎流量都有很大差异 [21], 但总体来看, 茎流形成的地区差异性仍有一定规律可循. Llorens[21]通过对欧洲地中海盆地沿岸地区 90 多篇研究论文的分析认为, 随着研究地区平均降雨量的增加, 茎流百分数呈现出减小的趋势, 而Levia等人 [2] 在总结不同生态系统类型下的茎流研究成果基础上, 得到热带, 温带, 荒漠 3 种生态系统下的最大平均茎流百分数分别为 3.5%, 11.3%和 19.0%的结论.

通过对多种曲线拟和结果的比较, 以Chapman指数函数可以较好地表达茎流百分数和降雨量、最大十分钟雨强之间的关系. 从曲线的变化趋势来看, 尽管树干茎流的绝对量随降雨量增加有显著的正比增长关系, 茎流百分数的变化却最终趋于平缓, 这一趋势与其他地区的研究结果相同 [17,34,39]. Martinez-Meza[33]的研究结果表明茎流百分数随降雨量增加的曲线在>6 mm降雨后趋于平缓. Pressland[34]认为随着降雨量的增加, 叶片和枝条逐渐被湿润达到饱和, 接

表 2　不同地区灌木(群落)的树干茎流比例

资料来源	实验地点	观测期降雨量/mm	灌木种类	树干茎流量/%
Carlyle-Moses[37]	马德雷山脉东部荒漠(墨西哥)	394.8	Matorral 群落	8.5±1.9
Martinez-Meza[33]	新墨西哥州南部吉娃娃荒漠	394.1	*Larrea tridentata*	10.0±6.4
	(美国)		*Prosopis slandulosa*	5.3±2.9
			Flourensia cernua	10.5±4.6
Navar[15]	利纳雷斯(Linares)(墨西哥)	230	*Diospyrus texana*, *Acacia farnesiana*, *Prosopis laevigata*	3.1
Ferreira[38]	Agueda 盆地 (葡萄牙)	156.8	*Eucalyptus globulus*	2.9
本文	陕西毛乌素沙地南缘(中国)	137	*Salix psammophila*	6.4±1.7
			Artemisia sphaerocephala	2.8±1.2

下来的部分降雨将以滴落的形式达到地面，而不是顺着叶片，枝条汇流于树干.

观测期间，在最小降雨量(1.1 mm)下籽蒿和沙柳均形成了树干茎流，茎流百分数分别为 0.16%(籽蒿)和 0.91%(沙柳)，说明两种灌木形成树干茎流的临界雨量很小. 一些研究结果表明[15,33,40]，荒漠灌木树干茎流形成的临界雨量值在 1.3~2 mm之间，而在本文所述地区会低于这一值.

已有研究表明[19,20]，树干茎流对土壤水分的补给明显，可更有效地被植物利用[2]. 为了表明树干茎流对根际区(basal area)的水分补给作用，Herwitz[41]提出了集流率(funnelling ratio)的概念，通过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:

$$FR = \frac{SF_{vol}}{BA \cdot P}, \quad (2)$$

其中FR表示集流率，SF_{vol}表示体积树干茎流量，BA表示树干基部的横截面积，P表示降雨量. 以多年平均降雨量来计算，籽蒿和沙柳的集流率分别为 41.5 (籽蒿)和 64.9(沙柳)，即籽蒿和沙柳分别可将相当于 41.5 倍和 64.9 倍的降雨量的水量输送进入根际区. Qiu等人[42]认为: 在沙地植被恢复过程中，随着物种增加、生境改善，流动和半固定沙丘将趋向于固定，而土壤水分含量将呈现明显下降的趋势. 就本文来看，树干茎流的水分补给作用可能对缓解这一水分下降的趋势、维持固沙植物的正常生长具有重要意义.

致谢 实验观测期间得到了北京师范大学陕西靖边试验站工作人员的大力支持，北京师范大学汤佳、唐艳、张晓影、孙丙彦、王卫、马育军、李岳坦对野外工作给予了很多帮助，胡霞、鲁瑞洁、王志、刘目星、张小啸、杜建会对文章的修改与完善提出了宝贵意见，审稿专家提出了宝贵意见和建议. 在此表示感谢.

参考文献

1 周择福，张光灿，刘霞，等. 树干茎流研究方法及其评述. 水土保持学报, 2004, 18(3): 137—140
2 Levia D F Jr, Frost E E. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. J Hydrol, 2003, 274: 1—29[DOI]
3 Schroth G, da Silva L F, Wolf M A, et al. Distribution of throughfall and stemflow in multi-strata agroforestry, perennial monoculture, fallow and primary forest in central Amazonia, Brazil. Hydrol Proc, 1999, 13: 1423—1436[DOI]
4 Stadler B, Michalzik B. Aphid infested Norway spruce are 'hot spots' in throughfall carbon chemistry in coniferous forests. Can J Forest Res, 1998, 28: 1717—1722[doi]
5 Price A G, Dunham K, Carleton T, et al. Variability of water fluxes through the black spruce (*Picea mariana*) canopy and feather moss (Pleurozium schreberi) carpet in the boreal forest of northern Manitoba. J Hydrol, 1997, 196: 310—323[doi]
6 Taniguchi M, Tsujimura M, Tanaka T. Significance of stemflow in groundwater recharge 1: Evaluation of the stemflow contribution to recharge using a mass balance approach. Hydrol Proc, 1996, 10: 71—80[doi]
7 Tanaka T, Taniguchi M, Tsujimura M. Significance of stemflow in groundwater recharge 2: A cylindrical infiltration model for evaluating the stemflow contribution to groundwatcr recharge. Hydrol Proc, 1996, 10: 81—88[doi]
8 Soulsby C, Reynolds B. The chemistry of throughfall, stemflow and soil water beneath oak woodland and moorland vegetation in upland Wales. Chem Ecol, 1994, 9: 115—134[doi]
9 Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall in an eucalypt forest and pine plantation in southeastern Australia. Ⅲ: Determination of the canopy storage capacity of a dry sclerophyll eucalypt forest. Hydrol Proc, 1990, 4: 157—167[doi]
10 Spechit R L. Dark island heat (Ninety Miles Plain, South Australia) Ⅳ: Soil moisture patterns produced by rainfall interception and stemflow. Aust J Bot, 1957, 5: 137—150 [doi]
11 Glover J, Gwynne M D. Light rainfall and plant survival in East Africa. Ⅱ. Dry grassland vegetation. J Ecol, 1962, 36: 199—206
12 Slatyer R O. Measurement of precipitation, interception by an arid plant community. (Acacia aneura F. Muell.). Arid Zone Res, 1965, 25: 181—192
13 Tromble J M. Water interception by two arid land shrubs. J Arid Environ, 1987, 15: 65—70
14 Navar J, Bryan R B. Interception loss and rainfall redistribution by three semi-arid growing shrubs in northeastern Mexico. J Hydrol, 1990, 115: 51—63[doi]

15 Navar J. The causes of stemflow variation in three semi-arid growing species of northeastern Mexico. J Hydrol, 1993, 145: 175—190[doi]
16 Mauchamp A, Janeau J L. Water funnelling by the crown of Flourensia cernua, a Chihuahuan Desert shrub. J Arid Environ, 1993, 25: 299—306[doi]
17 Martinez-Meza E, Whitford W G. Stemflow, throughfall and channelization of stemflow by roots in three Chihuahuan desert shrubs. J Arid Environ, 1996, 32: 271—287[doi]
18 Whitford W G, Anderson J, Rice P M. Stemflow contribution to the 'fertile island' effect in creosotebush, Larrea tridentata. J Arid Environ, 1997, 35: 451—457[doi]
19 Maitre D C Le, Scott D F, Colvin C. A review of information on interactions between vegetation and groundwater. Water SA. 1999, 25(2): 137—152
20 Nulsen R A, Bligh K J, Baxter I N, et al. The fate of rainfall in a mall and heath vegetated catchment in southern weatern Australia. Aust J Ecol, 1986, 11: 361—371[doi]
21 Llorens P, Domingo F. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. J Hydrol, 2007, 335: 37—54[doi]
22 李新荣, 赵雨兴, 杨志忠, 等. 毛乌素沙地飞播植被与生境演变的研究. 植物生态学报, 1999, 23(2): 116—124
23 王博, 丁国栋, 顾小华, 等. 毛乌素沙地腹地植被恢复效果初步研究——以内蒙古乌审旗为例. 水土保持研究, 2007, 14(3): 237—238
24 牛兰兰, 张天勇, 丁国栋. 毛乌素沙地生态修复现状、问题与对策. 水土保持研究, 2006, 13(6): 239—242
25 赵文智, 程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述. 科学通报, 2001, 46(22): 1851—1857
26 刘彦随, 查勇. 陕北沙地景观生态类型与土地优化配置. 干旱区资源与环境, 1997, 11(4): 86—90
27 全志杰, 王成吉, 王立宏, 等. 陕北榆林地区土地沙漠化动态遥感研究. 生态学杂志, 1996, 15(5): 23—26
28 王志, 彭茹燕, 王蕾, 等. 毛乌素沙地南缘改良与利用风沙土性质研究. 水土保持学报, 2006, 20(2): 14—21
29 彭茹燕. 沙地资源开发中土地质量的响应——以靖边县北部风沙区为例. 博士学位论文. 北京: 北京师范大学研究生院, 2004
30 汪一鸣, 赵小勇. 蒙陕宁甘长城沿线干旱风沙区土地沙漠化防治对策. 水土保持研究, 2002, 9(3): 1—4
31 Belmonte Serrato F, Romero Diaz A. A simple technique for measuring rainfall interception by small shrub: "Interception flow collection box". Hydrol Proc, 1998, 12: 471—481[doi]
32 Aboala J R, Moralesb D, Hernandezc M, et al. The measurement and modelling of the variation of stemflow in a laurel forest in Tenerife, Canary Islands. J Hydrol, 1999, 211: 161—175[doi]
33 Martinez-Meza E. Stemflow, throughfall, and root water channelization by three arid land shrubs in southern New Mexico. Doctor Dissertation. Las Cruces: New Mexico State University, 1994
34 Pressland A J. Soil moisture redistribution as affected by throughfall and stemflow in an arid zone shrub community. Aust J Bor, 1976, 24: 641—649[doi]
35 Feller M C. Water balances in Eucalyptus regnans Eoblicua and Pinus radiata forests in Victoria. Aust Forest, 1981, 44: 153—161
36 Peterson D L, Rolfe G L. Precipitation components as nutrient pathways in floodplain and upland forest of central Illinois. Forest Sci, 1982, 28: 321—332
37 Carlyle-Moses D E. Throughfall, stemflow and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. J Arid Environ, 2004, 58: 180—201
38 Ferreira A J D. Processos hidrologicos e hidroquimicos em povoamentos de Eucalyptus globulus Labill. e. Pinus pinaster Aiton. Doctor Dissertation. Aveiro: Universidade de Aveiro, 1996
39 Owens M K, Lyons R K, Alejandro C L. Rainfall partitioning within semiarid juniper communities: Effects of event size and canopy cover. Hydrol Proc, 2006, 20: 3179—3189[doi]
40 Gutierrez J R, Aguilera L E, Moreno R J. Evidences for intraspecific competition in the Chilean desert shrubs Atriplex podocarpa and Atriplex deserticola. Rev Chil Hist Nat, 1987, 60: 63—69
41 Herwitz S R. Infiltration-excess caused by stemflow in a cylone-prone tropical rainforest. Earth Surf Proc Land, 1986, 11: 401—412[doi]
42 Qiu G Y, Tomohisa Y, Kazuro M, et al. The succession of planted communities in Tengeri desert in relation to root distribution and soil water status. J Arid Land Stud, 1995, 4(2): 81—89