

## 祁连山典型高山灌丛树干茎流特征<sup>\*</sup>

刘章文<sup>1 2 3</sup> 陈仁升<sup>1 2 \*\*</sup> 宋耀选<sup>1 2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所黑河上游生态-水文试验研究站, 兰州 730000; <sup>2</sup> 中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室, 兰州 730000; <sup>3</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要** 2010 年 6—10 月, 对祁连山中段托勒南山金露梅、高山柳、沙棘和鬼箭锦鸡儿灌丛树干茎流进行试验观测, 研究了高山灌丛树干茎流特征, 以及降雨和冠层结构对灌丛树干茎流的影响。结果表明: 灌丛产生树干茎流需要 2.1 mm 的前期降雨量; 金露梅、高山柳、沙棘和鬼箭锦鸡儿灌丛树干茎流率分别为 3.4%、3.2%、8.0% 和 4.2%, 树干茎流量与降雨量之间成显著正线性相关; 随着雨量级的增加, 树干茎流率呈增加—减少—增加的趋势; 4 种灌丛茎干集流率分别为 59、30、110 和 49, 树干茎流对根际区水分补给作用明显; 灌丛树干茎流率与最大 10 min 雨强( $I_{10}$ ) 呈指数关系, 当  $I_{10} > 6.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  时, 高山柳和沙棘树干茎流率继续增大, 而金露梅和高山柳树干茎流率趋于稳定; 冠层结构对树干茎流的影响较复杂, 相同降雨条件下, 株高和投影面积是祁连山高山灌丛树干茎流的主要影响因子。

**关键词** 树干茎流 集流率 灌丛 祁连山

文章编号 1001-9332(2011)08-1975-07 中图分类号 P933 文献标识码 A

**Characteristics of stemflow for typical alpine shrubs in Qilian Mountain.** LIU Zhang-wen<sup>1 2 3</sup>, CHEN Ren-sheng<sup>1 2</sup>, SONG Yao-xuan<sup>1 2</sup> (<sup>1</sup>Heihe Upstream Watershed Ecology-Hydrology Experimental Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; <sup>2</sup>Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; <sup>3</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2011 22(8): 1975–1981.

**Abstract:** Taking the typical alpine shrubs *Potentilla fruticosa*, *Salix cupularis*, *Hippophae rhamnoides*, and *Caragana jubata* in Qilian Mountain as test objects, a field investigation from June 1 to October 31, 2010 was conducted on the variation characteristics of the shrub stemflow, and analyzed the affecting effects of rainfall intensity and canopy structure morphology. The stemflow generated when the rainfall in early period was 2.1 mm, with an average of 3.4%, 3.2%, 8.0%, and 4.2% of the gross rainfall for *P. fruticosa*, *S. cupularis*, *H. rhamnoides*, and *C. jubata*, respectively. There was a significant positive linear correlation between the stemflow and rainfall intensity. With increasing rainfall, the stemflow percentage showed a trend of increase-decrease-increase. Stemflow played an important role in supplying water to the shrub rhizosphere, and the average funneling ratio was 59, 30, 110, and 49 for *P. fruticosa*, *S. cupularis*, *H. rhamnoides*, and *C. jubata*, respectively. The stemflow percentage had a significant exponential relationship with the maximum rain intensity in 10 minutes ( $I_{10}$ ). When the  $I_{10}$  was more than  $6.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , the stemflow of *H. rhamnoides* and *C. jubata* showed a persistently increasing trend, while that of *P. fruticosa* and *S. cupularis* tended to be stable. Canopy structure morphology had complicated effects on the stemflow. In the same rainfall intensities, the height and crown projection area of the shrubs were the important factors affecting the generation of stemflow.

**Key words:** stemflow; funneling ratio; shrub; Qilian Mountain.

\* 国家自然科学基金项目(91025011、40771045)和国家基础科学人才培养基金冰川冻土特殊学科人才培养项目(J0930003/J0109)资助。

\*\* 通讯作者。E-mail: crs2008@lzb.ac.cn

2011-01-16 收稿, 2011-05-03 接受。

植被冠层将降水重新再分配为穿透雨、树干茎流和林冠截留,是森林生态系统水分传输的第一界面层<sup>[1-3]</sup>。与穿透水量相比,树干茎流占总降水量的比例较小<sup>[4]</sup>,因此一些研究将这部分水量忽略<sup>[5-8]</sup>。但是,树干茎流能够改变降水的空间分布<sup>[9]</sup>,使降水和养分集中于植物茎干附近<sup>[10]</sup>,影响树干周围的土壤水分<sup>[11-12]</sup>、养分含量及微生物的活动<sup>[5]</sup>。因此,开展树干茎流的相关研究具有重要的生态水文和生物地球化学意义<sup>[9,11-13]</sup>。国外有关灌丛树干茎流的研究多集中在地中海气候区<sup>[2,13-15]</sup>,国内主要集中在干旱半干旱区。研究表明,毛乌素沙地沙柳(*Salix psammophila*)和籽蒿(*Artemisia sphaerocephala*)灌丛的树干茎流率为7.6%和2.7%,降雨特征和植被结构特征对树干茎流有影响<sup>[16-17]</sup>;腾格里沙漠柠条灌丛(*Caragana korshinskii*)树干茎流率为7.9%,树干茎流对根际区水分补给作用明显,为同期降水量的30~100倍<sup>[12,17-18]</sup>;科尔沁沙地小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌丛的树干茎流率为4.0%<sup>[19]</sup>。上述研究中,不同地区、不同灌丛树干茎流均有差异,影响树干茎流的降雨特征与植被特征因素也不一致<sup>[20]</sup>。以前研究主要集中在干旱半干旱区,对高山灌丛的树干茎流研究涉及极少,高山典型灌丛树干茎流产生的条件、影响因素、树干茎流与降雨特征和植被结构特征关系等问题还不明确,有必要加强高山灌丛树干茎流的研究。

祁连山灌丛面积 $4.13 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,约占祁连山区林业用地面积的68%,是祁连山山地海拔3000~3800 m的顶极群落,其有效涵养水量在 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上,是一座大的“绿色水库”<sup>[21]</sup>。本文选取祁连山托勒南山北坡典型高山灌丛为研究对象,通过对灌丛树干茎流的观测,探讨降雨特征与树干茎流的关系,以及影响灌丛树干茎流的灌丛冠层结构指标,揭示树干茎流形成的过程和变化规律,为进一步认识祁连山高山灌丛的生态水文功能提供观测数据和经验参数。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验布设在黑河上游中国科学院寒区旱区环境与工程研究所黑河祁连站马粪沟试验流域,地理位置为 $38.2^\circ \text{ N}$ , $99.9^\circ \text{ E}$ ,流域面积 $23.1 \text{ km}^2$ ,海拔2960~4820 m。该流域寒区景观类型齐全,主要乔木树种为青海云杉(*Picea crassifolia*),零星分布着祁连

圆柏(*Sabina przewalskii*),在阴坡、半阴坡和半阳坡分布大量灌丛,主要有鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)、银露梅(*Potentilla glabra*)、高山柳(*Salix cupularis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等。草本植物主要有珠牙蓼(*Polygonum viviparum*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、针茅(*Stipa capillata*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)和披碱草(*Elymus dahuricus*)等。土壤主要有山地森林灰褐土、山地栗钙土、草甸土、亚高山灌丛草甸土和高山寒漠土等类型。

### 1.2 试验设计

经野外调查,选取具有代表性的金露梅、高山柳、沙棘和鬼箭锦鸡儿灌丛,在海拔3203~3370 m分别设置了 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的标准样地。

每种灌丛选取4株进行树干茎流观测。单株生灌丛在所有枝下茎上进行测定,丛生灌丛树干茎流采用标准枝法<sup>[19]</sup>,对所选灌丛的每一枝基径进行测量,取平均值,然后选择与基径平均值相当的树干作为标准枝。由于灌丛茎干直径小,不适合缠绕引流法等常规观测方法<sup>[9-10]</sup>,因此将剖开的聚乙烯塑料软管直接卡在灌丛茎干上,并用塑料胶布和玻璃胶固定,将该塑料管直接接入树干茎流收集瓶,瓶口粗细与塑料管一致,避免降雨和穿透雨进入收集瓶,使用前经过人工试验,可以精确地收集树干茎流。每个收集瓶实测水量除以该标准枝投影面积,得到该枝树干茎流量,标准枝上的树干茎流量乘以整个灌丛的枝数,即可得到整个灌丛的树干茎流量。

为了说明树干茎流对根际区的水分补给作用,Herwitz<sup>[22]</sup>提出了集流率(funneling ratio)的概念:

$$FR = \frac{SF_v}{BA \times P} \quad (1)$$

式中:FR为集流率; $SF_v$ 为体积树干茎流量(L);BA为树干基部的横截面积( $\text{m}^2$ );P为降雨量(mm); $BA \times P$ 表示无植被存在时到达树干横截面积上的降雨量,FR为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。

林外降雨使用DSJ2型虹吸式自记雨量计,同时用试验点附近黑河祁连站人工气象站降雨数据进行校正。为减少测定过程中的蒸发损失,在雨后及时测量树干茎流,若夜间降雨,则第二天清晨取样。

### 1.3 数据处理

采用Microsoft Excel 2003和Origin 8.0软件对

数据进行处理和绘图,采用 SPSS 软件进行数据分析.采用单因素方差分析( one-way ANOVA) 和最小显著差异法( LSD) 比较不同数据组间的差异,用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关关系,显著性水平设定为  $\alpha = 0.05$ .

2 结果与分析

2.1 研究期间研究区降雨特征

2010 年 6 月 1 日至 10 月 31 日试验期间共观测到降雨 55 次,总降雨量 298.6 mm,次最大降雨量 23.5 mm,最小降雨量 0.3 mm. 为便于分析,按照降雨量将降雨分为 6 个等级(表 1). 其中,34.5% 的降雨事件 < 2 mm,60.0% 的降雨事件 < 5 mm,83.6% 降雨事件 < 10 mm, > 10 mm 的降雨事件仅占 16.4%,呈明显的偏态分布.

观测期间,平均降雨强度  $3.4\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,最小降雨强度  $0.4\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,最大降雨强度  $16.5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,各雨量级对应的平均降雨强度见表 1. 总体来看,2~10 mm 降雨量、 $1.0\sim4.0\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  降雨强度的降雨事件出现次数较多.

2.2 降雨特征对灌丛树干茎流的影响

2.2.1 降雨量 由表 2 可以看出,降雨期间,各灌丛

表 1 试验期间研究区降雨特征  
Table 1 Rainfall characteristics of experimental area during the experimental period

降雨量级 Rainfall class (mm)	降雨次数 Rainfall frequency	降雨次数 百分比 Frequency percentage	降雨量 Rainfall (mm)	降雨量 百分比 Rainfall percentage	降雨强度 Rainfall intensity ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )
<2	19	34.5	15.4	5.2	0.7
2~5	14	25.5	45.0	15.1	1.9
5~10	13	23.6	91.5	30.6	1.7
10~15	4	7.3	52.0	17.4	11.2
15~20	3	5.5	51.0	17.1	6.9
>20	2	3.6	43.7	14.6	1.9

表 2 不同高山灌丛树干茎流、树干茎流率及集流率  
Table 2 Stemflow, stemflow percentage and funneling ratios of four alpine shrubs

灌丛 Shrub	树干茎流量 Stemflow (mm)	树干茎流率 Stemflow percentage	集流率 Funneling ratio
金露梅 <i>P. fruticos</i>	9.5	3.4	59
高山柳 <i>S. cupularis</i>	9.1	3.2	30
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	22.5	8.0	110
鬼箭锦鸡儿 <i>C. jubata</i>	11.8	4.2	49

树干茎流量(SF) 和树干茎流率(树干茎流量占降雨量的百分比, SF%) 中,沙棘最大,高山柳最小. 以次降雨来看,金露梅树干茎流量的变化为  $0.01\sim0.87\text{ mm}$ ,占次降雨量的  $0.4\%\sim3.7\%$ ;高山柳树干茎流量的变化为  $0.01\sim1.1\text{ mm}$ ,占次降雨量的  $0.4\%\sim4.7\%$ ;沙棘树干茎流量的变化为  $0.06\sim2.28\text{ mm}$ ,占次降雨量的  $2.0\%\sim11.3\%$ ;鬼箭锦鸡儿树干茎流量的变化为  $0.02\sim1.46\text{ mm}$ ,占次降雨量的  $0.5\%\sim7.2\%$ .

利用式(1) 计算了 4 种灌丛的集流率,金露梅、高山柳、沙棘和鬼箭锦鸡儿的集流率分别为 59、30、110 和 49. 灌丛茎干对降雨具有明显的汇集作用. 沙棘灌丛树干茎流对根际区的补给作用最强,达到同期降水的 110 倍,而金露梅和鬼箭锦鸡儿为 59 和 49 倍,高山柳的茎干补给根际水分能力最弱,为同期降水量的 30 倍.

4 种灌丛树干茎流量与次降雨量之间均呈显著的线性正相关关系(图 1).

由图 2 可以看出,不同降雨量级下灌丛树干茎流率变化差别很大,随着降雨量级的增加,树干茎流率呈增加-减少-增加的趋势. 沙棘的树干茎流率明显高于其他 3 种灌丛. 金露梅的树干茎流率在降雨  $10\sim15\text{ mm}$  范围内达到最大,高山柳、沙棘和鬼箭锦鸡儿树干茎流率在  $>20\text{ mm}$  降雨事件时达到最大.

2.2.2 降雨强度 经统计分析,平均降雨强度与树干茎流率的相关关系不明显,可能是降雨过程中降雨分配不均匀,平均降雨强度不能很好地反映实际的降雨强度. 因此进一步分析了次降雨最大 10 min 降雨强度( $I_{10}$ ) 与树干茎流率的关系(图 3). 4 种灌丛树干茎流率与  $I_{10}$  的关系均为指数增长函数. 在较小降雨强度下,树干茎流率增加较快,当  $I_{10}>6.0\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  时,金露梅和高山柳树干茎流率趋于稳定值.

2.3 灌丛冠层结构特征对树干茎流的影响

由表 3 可以看出,单株树干茎流量与 4 种灌丛株高和冠层投影面积呈显著正相关,树干茎流量除与鬼箭锦鸡儿枝下高呈正相关之外,与其他灌丛枝下高相关性均不显著. 树干茎流量与金露梅基径为负相关,与鬼箭锦鸡儿为显著正相关,与高山柳和沙棘的相关性不显著. 树干茎流量与高山柳灌丛分枝倾角为正相关,与鬼箭锦鸡儿分枝倾角为负相关,与金露梅和沙棘的相关性不显著.

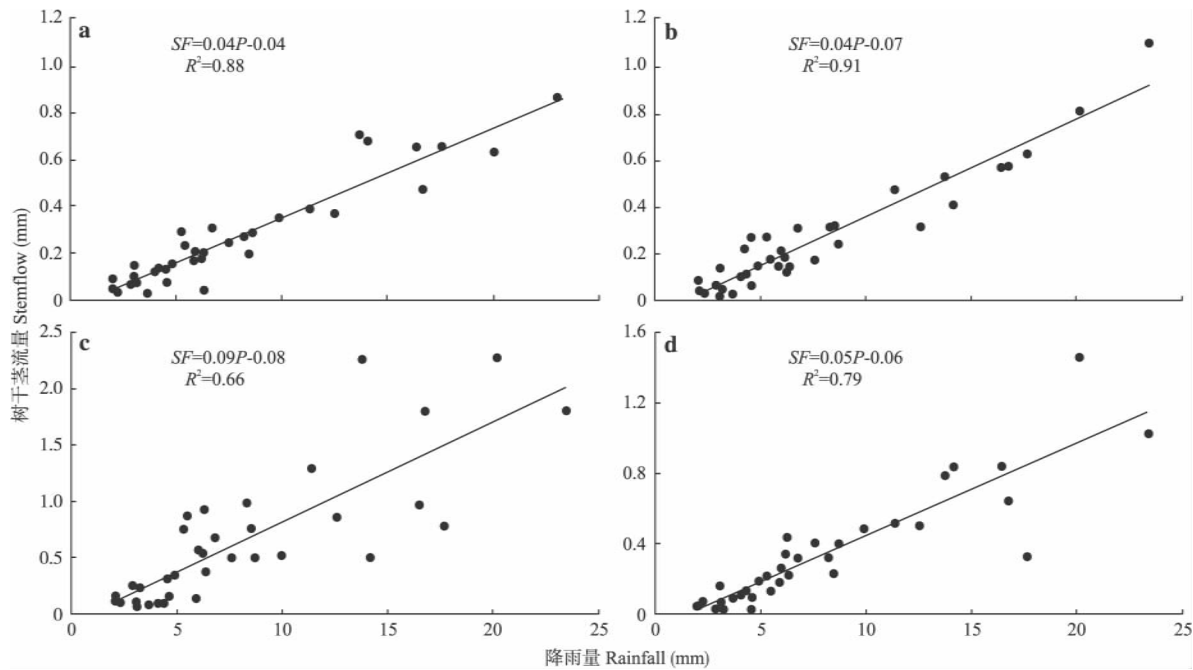


图 1 4 种高山灌丛树干茎流量与降雨量的关系  
**Fig.1** Relationships between stemflow and rainfall of four alpine shrubs.  
a) 金露梅 *P. fruticosa*; b) 高山柳 *S. cupularis*; c) 沙棘 *H. rhamnoides*; d) 鬼箭锦鸡儿 *C. jubata*. 下同 The same below.

表 3 4 种灌丛冠层结构特征及其与树干茎流量的相关系数  
**Table 3** Correlation coefficients between stemflow and canopy structure morphology of four shrubs

灌 丛 Shrubs	项目 Item	株高 Height ( m )	枝下高 HBB ( m )	投影面积 Projection area ( m <sup>2</sup> )	基径 Basal diameter ( cm )	分枝倾角 Branch angle ( ° )
金露梅 <i>P. fruticosa</i>	均值 Mean	0.56	0.27	0.38	0.75	32
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0.55 **	0.20 <sup>ns</sup>	0.49 **	-0.30 *	-0.11 <sup>ns</sup>
高山柳 <i>S. cupularis</i>	均值 Mean	1.40	0.79	0.56	1.54	56
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0.52 **	0.12 <sup>ns</sup>	0.54 **	0.17 <sup>ns</sup>	0.26 *
沙 棘 <i>H. rhamnoides</i>	均值 Mean	0.63	0.26	1.68	4.77	43
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0.29 *	-0.04 <sup>ns</sup>	0.71 **	0.20 <sup>ns</sup>	-0.14 <sup>ns</sup>
鬼箭锦鸡儿 <i>C. jubata</i>	均值 Mean	1.73	0.84	0.23	1.72	62
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0.99 **	0.38 *	0.64 **	0.9 **	-0.32 *

HBB: Height between the base and first branch. \* *P* < 0.05; \*\* *P* < 0.01; ns: 不显著 Not significant.

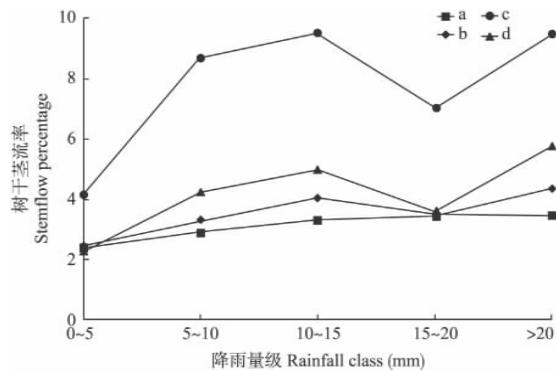


图 2 不同高山灌丛树干茎流率与降雨量级的关系  
**Fig.2** Relationships between stemflow percentage of four alpine shrubs and rainfall class.

3 讨 论

3.1 高山灌丛树干茎流与降雨量的关系

本研究中,金露梅、高山柳、沙棘和鬼箭锦鸡儿灌丛树干茎流率分别为 3.4%、3.2%、8.0% 和 4.2%,这与大部分干旱半干旱地区灌丛的树干茎流率变化范围(2%~10%)相一致<sup>[20]</sup>.研究表明,墨西哥约纳达地区三齿常绿香(*Larrea tridentata*)和油柴(*Flourensia cernua*)灌丛树干茎流率约 10%,牧豆树(*Prosopis chilensis*)灌丛树干茎流率为 5%<sup>[23]</sup>.腾格里沙漠柠条(7.9%)<sup>[8,18]</sup>、科尔沁沙地小叶锦鸡儿(4.0%)<sup>[19]</sup>、毛乌素沙地沙柳(7.6%)和籽蒿(2.7%)树干茎流率与本研究相比差别不大<sup>[16-17]</sup>.

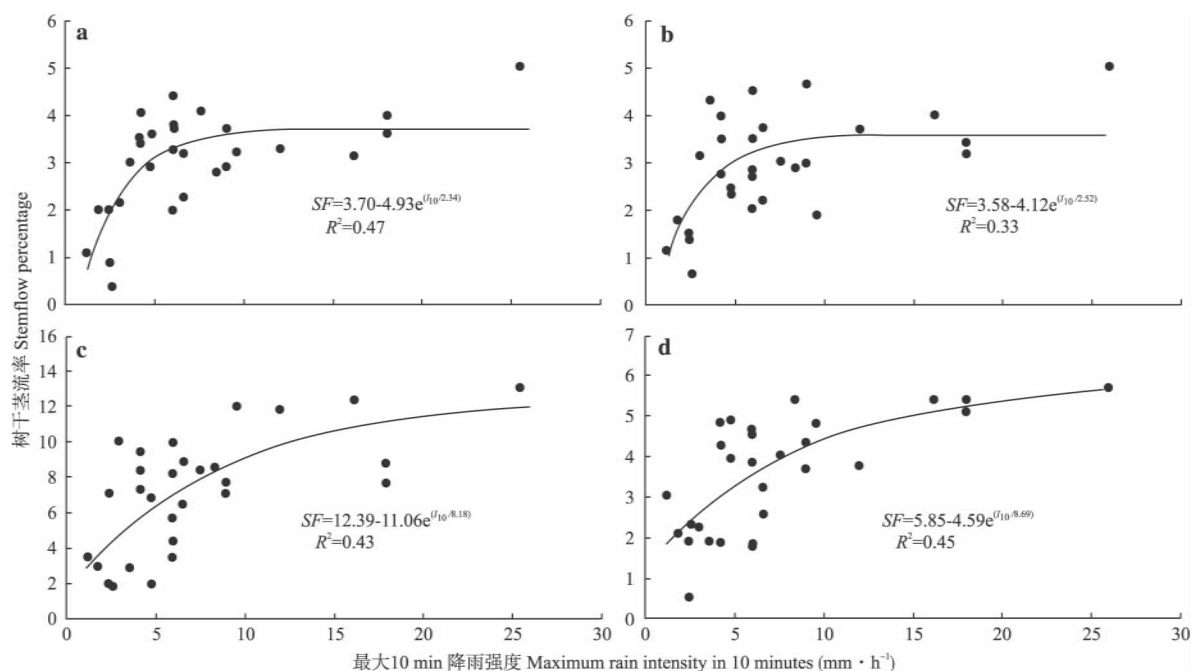


图3 4种高山灌丛树干茎流率与最大10 min降雨强度( $I_{10}$ )的关系

Fig.3 Relationships between stemflow percentage of four alpine shrubs and maximum 10 minute rainfall intensity ( $I_{10}$ ).

而澳大利亚金合欢(*Acacia aneura*)和桉树(*Eucalyptus globulus*)灌丛树干茎流率高达42%<sup>[24-25]</sup>.不同地区的不同物种,甚至同一物种的树干茎流率相差很大.这是由于研究区不同,降雨条件存在差异,尤其是干旱半干旱区和高山区降水特征相差较大,从而导致树干茎流相差很大.本研究中4种灌丛的集流率分别为59、30、110和49,与杨志鹏等<sup>[17]</sup>得出沙柳(64.9)与籽蒿(41.5),以及腾格里沙漠柠条(89.8)的结果一致<sup>[8]</sup>,低于地中海区灌丛的集流率(30~260)<sup>[13]</sup>,说明树干茎流对高山灌丛根际区水分补给作用明显.

降雨量级的大小影响灌丛树干茎流的形成. Wang等<sup>[8]</sup>研究表明,荒漠灌丛产生树干茎流的临界降雨量是2.2 mm.本研究中,当降雨量<2.1 mm时4种灌丛均没有树干茎流产生,而每种灌丛产生树干茎流的临界降雨量仍需进一步观测.据野外实地观测,沙棘的冠幅比其余3种灌丛大,有利于树干茎流形成;高山柳茎干光滑,较小的降雨量即可使枝条、叶片的水量饱和,随降雨量增加,树干茎流量呈增加趋势,最大茎流率出现在>20 mm降雨量级;而金露梅叶片枝干细小,雨量过大时,降雨难以在冠层表面停留而直接滴落至地面,树干茎流量减小,最大茎流率出现在10~15 mm降雨量级.4种灌丛在15~20 mm降雨量时都有一个较为明显的下降趋势,这可能与降雨特征和风的影响有关<sup>[11,13]</sup>.15~

20 mm雨量级共有3次降雨事件,降雨量分别为17.7、16.6和16.8 mm,降雨强度分别为2.2、16.5和2.1 mm·h<sup>-1</sup>.其中两次小降雨强度降雨过程中均发生中断,这种非连续型降雨会增加林冠的截留量,从而减少树干茎流的比例<sup>[26-27]</sup>.同时,两次降雨期间风速都较大,会影响降雨在林冠的停留时间,使冠层截留降水吹落到地面,间接影响树干茎流的形成过程,使树干茎流减少<sup>[28]</sup>.

### 3.2 高山灌丛树干茎流与降雨强度的关系

灌丛树干茎流率与次降雨最大10 min降雨强度( $I_{10}$ )呈指数函数关系.随着 $I_{10}$ 的增加,树干茎流显著增加,当 $I_{10} > 6.0$  mm·h<sup>-1</sup>时,金露梅和高山柳的树干茎流率趋于稳定,沙棘和鬼箭锦鸡儿则呈持续缓慢上升趋势.这比毛乌素沙地的研究结果要高出2和3倍( $I_{10} > 2.0$  mm·h<sup>-1</sup>, 3.0 mm·h<sup>-1</sup>)<sup>[17]</sup>,可能是降雨特征与植被结构特征的共同影响所致. Herwitz<sup>[29]</sup>研究表明,大雨强降水不利于树干茎流的形成.在较大的降雨事件中,低强度降雨虽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,这部分降雨在总雨量中所占的比例将削弱,同时,由于枝干表面水吸持力一定,高强度降雨将增加树干茎流在传输过程中以穿透雨形式滴落的概率<sup>[13,30]</sup>,因而降雨量达到一定值时,树干茎流率会维持在一定的范围内.这也解释了在雨量为16.6 mm、降雨强度为16.5 mm·h<sup>-1</sup>的次降雨过程中树干茎流率仍

然较小的原因。

### 3.3 高山灌丛树干茎流与冠层结构特征的关系

灌丛的结构特征对树干茎流产生的影响比较复杂。美国新墨西哥州南部荒漠灌丛群落树干茎流量与茎干倾角和长度、树冠大小呈正相关关系<sup>[31]</sup>。毛乌素沙地沙柳和籽蒿灌丛树干茎流量与分枝数、树冠体积和投影面积有较高的正相关关系,而与枝下高、地径和分枝倾角成负相关<sup>[17]</sup>。中国南方红壤区油桐(*Vernicia fordii*)单株树干茎流与基径、株高和冠层面积呈极显著正相关,但与枝下高的相关性不显著<sup>[32]</sup>。川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*)树干茎流与树干基面积呈指数增长关系<sup>[33]</sup>。地中海灌丛株高、基径、投影面积、茎干生物量、灌丛总生物量和表面密度均与灌丛树干茎流呈正相关,叶面积和茎干倾角相关性不显著<sup>[13]</sup>。本研究中,树干茎流与灌丛株高和投影面积呈正相关,与鬼箭锦鸡儿灌丛枝下高和基径为正相关,而与鬼箭锦鸡儿分枝倾角呈负相关,与高山柳分枝倾角呈正相关。沙棘和鬼箭锦鸡儿树干茎流量与冠层投影面积为正相关。这说明在同样降雨条件下,灌丛株高和冠幅投影面积是影响祁连山高山灌丛树干茎流的主要因素。

本研究由于观测时间较短,尚不能区分每类灌丛产生树干茎流的临界降雨量。另外,还有一些植被结构参数,如叶面积、生物量、树冠体积和冠层持水能力等指标没有测量,后续试验应增加树干茎流观测灌丛的数量,同时补充其他冠层结构特征的观测,以进一步探讨影响高山灌丛树干茎流形成的冠层结构和降水特征。

### 参考文献

- [1] Zhao Y-T (赵玉涛), Zhang Z-Q (张志强), Yu X-X (余新晓). Review on water transfer mechanisms between interfaces of forestry watershed. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2002, **16** (1): 92–95 (in Chinese)
- [2] Carlyle-moses DE. Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. *Journal of Arid Environments*, 2004, **58**: 181–202
- [3] Nívar J, Bryan RB. Interception loss and rainfall redistribution by three semi-arid growing shrubs in northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*, 1990, **115**: 51–63
- [4] Xu L-H (徐丽宏), Shi Z-J (时忠杰), Wang Y-H (王彦辉), et al. Canopy interception characteristics of main vegetation types in Liupan Mountains of China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(10): 2487–2493 (in Chinese)
- [5] Delphis FLJ, Ethan EF. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. *Journal of Hydrology*, 2003, **274**: 1–29
- [6] Marin CT, Bouten W, Sevink J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology*, 2000, **237**: 40–57
- [7] Price AG, 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. *Journal of Hydrology*, 1997, **196**: 310–323
- [8] Wang X-P (王新平), Kang E-S (康尔泗), Zhang J-G (张景光), et al. Comparison of interception loss in shrubby and sub-shrubby communities in the Tengger desert of Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 2004, **26**(1): 89–94 (in Chinese)
- [9] Zhou Z-F (周择福), Zhang G-C (张光灿), Liu X (刘霞), et al. Review on research methods of stemflow. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2004, **18**(3): 137–140 (in Chinese)
- [10] Belmonte SF, Romero DA. A simple technique for measuring rainfall interception by small shrub “Interception flow collection box”. *Hydrological Processes*, 1998, **12**: 471–481
- [11] Aboal JR, Morales D, Hernández M, et al. The measurement and modelling of the variation of stemflow in laurel forest in Tenerife, Canary Islands. *Journal of Hydrology*, 1999, **221**: 161–175
- [12] Wang XP, Wang ZN, Berndtsson R. et al. Desert shrub stemflow and its significance in soil moisture replenishment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, **15**: 561–567
- [13] Garcia-Estringana P, Alonso-Blázquez N, Alegre J. Water storage capacity, stemflow and water funneling in Mediterranean shrubs. *Journal of Hydrology*, 2010, **389**: 363–372
- [14] Llorens P, Domingo F. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions: A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*, 2007, **335**: 37–54
- [15] Mauchamp A, Janeau JL. Water funneling by the crown of *Flourensia cernua*, a Chihuahuan Desert shrub. *Journal of Arid Environments*, 1993, **25**: 299–306
- [16] Li XY, Liu LY, Gao SY, et al. Stemflow in three shrubs and its effect on soil water enhancement in semi-arid loess region of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, **148**: 1501–1507
- [17] Yang Z-P (杨志鹏), Li X-Y (李小雁), Liu L-Y (刘连友), et al. Characteristics of stemflow for sand-fixed shrubs in Mu Us sandy land, Northwest China. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2008, **53**(8): 939–945 (in Chinese)
- [18] Wang Z-N (王正宁), Wang X-P (王新平). Stemflow of *Caragana korshinskii* and its infiltration and redistribution in desert environment. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2010, **30**(5): 1108–1113 (in Chinese)

- nese)
- [19] Li Y-Q (李衍青), Zhang T-H (张铜会), Zhao X-Y (赵学勇), *et al.* Rainfall interception and stemflow for *Caragana microphlloina* in Horqin Sandy Land, northern China. *Acta Pratacultrae Sinica* (草业学报), 2010, **19** (5): 267 – 272 (in Chinese)
- [20] Yang Z-P (杨志鹏), Li X-Y (李小雁), Yi W-J (伊万娟). Review on stemflow of desert shrubs—research methods and eco-hydrological effects. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2010, **30** (2): 303 – 311 (in Chinese)
- [21] Wang X-F (王学福). The importance of shrub in Qilian Mountain and its protection and development countermeasures. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology* (甘肃林业科技), 2005, **30** (2): 32 – 35 (in Chinese)
- [22] Herwitz SR. Infiltration-excess caused by stemflow in a cyclone-prone tropical rainforest. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1986, **11**: 401 – 412
- [23] Martinez-Meza E, Whirford WG. Stemflow, throughfall, and channelization of stemflow by roots in three Chihuahuan desert shrubs. *Journal of Arid Environments*, 1996, **32**: 271 – 287
- [24] Pressland AJ. Rainfall partitioning by an arid woodland (*Acacia aneura* F. Meull.) in south-western Queensland. *Australian Journal of Botany*, 1973, **21**: 235 – 245
- [25] Nulsen RA, Bligh KJ, Baxter IN, *et al.* The fate of rainfall in a mallee and heath vegetated catchment in southern Western Australia. *Australian Journal of Ecology*, 1986, **11**: 361 – 371
- [26] Rutter AJ, Morton AJ. A predictive model of rainfall interception in forest. III. Sensitivity of the model to stand and parameters and meteorological variables. *Journal of Applied Ecology*, 1977, **14**: 567 – 588
- [27] Zeng N, Shuttleworth JW, Gash JHC. Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. III. Point analysis. *Journal of Hydrology*, 2000, **228**: 228 – 241
- [28] Klaassen W. Evaporation from rain-wetted forest in relation to canopy wetness, canopy cover, and net radiation. *Water Resources Research*, 2001, **37**: 3227 – 3236
- [29] Herwitz SR. Raindrop impact and water flow on the vegetative surfaces of trees and the effects on stemflow and throughfall generation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987, **12**: 425 – 432
- [30] Crockford RH, Richardson DP. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: Effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 2000, **14**: 2903 – 2920
- [31] Martinez-Meza E. Stemflow, Throughfall, and Root Water Channelization by Three Arid Land Shrubs in Southern New Mexico. PhD Thesis. Las Cruces: New Mexico State University, 1994
- [32] Cao Y (曹云), Ouyang Z-Y (欧阳志云), Huang Z-G (黄志刚), *et al.* Hydrological characteristics of *Vernicia fordii* in red soil region of mid-subtropics. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27** (5): 1740 – 1747 (in Chinese)
- [33] He C-Q (何常青), Xue J-H (薛建辉), Wu Y-B (吴永波), *et al.* Rainfall redistribution in subalpine *Quercus aquifolioides* forest in upper reaches of Minjiang River. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19** (9): 1871 – 1876 (in Chinese)

作者简介 刘章文,男,1985年生,硕士研究生.主要从事寒区生态水文研究. E-mail: owen1231@126.com

责任编辑 李凤琴