

矮化枣树冠层改变降雨截留历时过程同位素和化学特征

陶泽¹, 司炳成^{1,2,3}, 靳静静²

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 3. 萨斯喀彻温大学土壤学系, 加拿大 萨斯卡通市, S7N5A8)

摘要: 基于冠层截留历时过程降雨同位素和化学特征的研究很少, 但却有助于揭示冠层截留特征及其对降雨同位素和化学特征的影响, 于2016年9月17—18日和10月22—23日对黄土高原丘陵沟壑区的2场降雨事件林外降雨、穿透降雨和树干茎流历时过程进行连续采样及室内分析, 研究降雨过程中矮化枣树冠层截留对降雨同位素和化学成分的改变、2016年7—10月4棵矮化枣树树干茎流以及林外降雨取样测定, 分析矮化枣树形态特征对其树干茎流率的影响。结果表明: (1) 矮化枣树树干茎流率可达2.3%~5.6%, 2场降雨事件中当降雨量分别达到1.4、1.2 mm时, 开始产生树干茎流; (2) 通过比较2场降雨事件历时过程穿透降雨、树干茎流同林外降雨的稳定同位素和水化学特征算术平均值得出, 穿透降雨、树干茎流 $\delta^2\text{H}$ 分别富集1.6‰~4.0‰和6.6‰~8.9‰, Cl^- 浓度分别增加到林外降雨1.4~3.0倍和13.3~13.4倍, SO_4^{2-} 浓度分别增加到1.5~2.7倍和4.8~7.1倍, 穿透降雨和树干茎流相对林外降雨呈现一定滞后; 降雨历时过程中稳定同位素 $\delta^2\text{H}$ 与前时刻降雨以及截留过程进一步蒸发有关, 水化学成分改变受植被截留影响逐渐减弱。

关键词: 矮化枣树; 降雨历时过程; 冠层截留; 穿透降雨; 树干茎流; 稳定同位素; 水化学特征

中图分类号: S715.2; O615.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0189-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.030

Canopy Interception Modified Intra-rainfall Isotopic and Hydrochemical Characteristics of Dwarfed Jujube Tree

TAO Ze¹, SI Bingcheng^{1,2,3}, JIN Jingjing²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F, Yangling,

Shaanxi 712100; 2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Area of China, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100; 3. Department of Soil Science, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada S7N5A8)

Abstract: Numerous studies have been conducted on canopy interception and its influence on inter-rainfall isotopic composition and hydrochemical properties. However, little is known about how isotopic and hydrochemical characteristics change in rainfall duration. The objective of this study was to understand the isotopic and hydrochemical characteristics of dwarfed jujube tree in rainfall duration. The water from stemflow, throughfall and rainfall in an open air were sampled continuously from two intra-rainfall events on Sept. 17—18 and Oct. 22—23, 2016 in the hilly and gully region of the Loess Plateau. At the same time, the volume of stemflow and rainfall in the open air were measured for four dwarfed jujubes of inter-rainfall events from July to Oct, 2016. The results showed that: (1) Average stemflow rate of dwarfed jujube was 2.3%~5.6% for inter-rainfall events; and stemflow was occurred when the rainfall amount reached 1.2 mm and 1.4 mm during the two intra-rainfall events. (2) Relative to the rainfalls in the open area for two intra-rainfall events, the arithmetic-averaged $\delta^2\text{H}$ of the throughfall and stemflow were enriched by 1.6‰~4.0‰ and 6.6‰~8.9‰, respectively; their arithmetic-averaged Cl^- concentrations increased by 1.4~3.0 times and 13.3~13.4 times, respectively; their arithmetic-averaged SO_4^{2-} concentrations increased by 1.5~2.7 times and 4.8~7.1 times, respectively. The throughfall and stemflow lagged behind the rainfall in the open area; during the intra-rainfall events, the delay was influenced by jujube tree canopy interception, the isotope was influenced by the prior period rainfall and further evaporation. The changes of hydrochemical components were gradually weakened with the increasing elapsed time since the start of a rainfall event.

收稿日期: 2017-05-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(K305021308); "千人计划"司炳成教授平台建设费科研专项(Z111021309); "千人计划"司炳成实验室运行科研专项(Z111021308)

第一作者: 陶泽(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤水文研究。E-mail: 13572021069@163.com

通信作者: 司炳成(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤物理学及土壤水文研究。E-mail: Bing.Si@usask.ca

Keywords: dwarfed jujube tree; rainfall duration; canopy interception; throughfall; stemflow; stable isotope; hydrochemical characteristics

冠层截留是 SPAC(Soil-Plant-Atmosphere Continuum)水循环中的重要环节,是植被对降雨的第一次分配过程^[1-3]。降雨经过植被截留损失后,部分穿过枝叶以穿透降雨形式降落到地面,另一部分通过植被枝干的汇集,以树干茎流方式沿着主干进入到土壤。林冠对降雨的截留作用,减缓了降雨对地面的侵蚀冲刷^[1-2],同时也让部分降雨沿着枝干汇集到植被主干,达到对深层土壤水和营养物质的集中补给^[2]。许多森林植被的截留率可以达到 9.13%~25.3%^[3-4],这对于水文过程的研究是一个不可忽略的过程。

目前关于植被冠层截留的研究主要是基于不同场次降雨的特征,收集不同强度降雨下的截留水,建立截留与次降雨量、林冠特征等之间相关关系^[5-6]。已有研究表明,植被的截留作用对降雨的稳定同位素和水化学特征有一定的改变^[2,7-8],但是对于降雨历时过程稳定同位素以及水化学特征演变规律及其原因分析较少。这主要是由于仪器设备、试验条件和目的等因素的制约而造成的。降雨过程中同位素和水化学示踪剂成分的历时变化以及冠层截留对其的影响常被忽略,这对于权衡树干茎流中降水成分及其在流域运移路径的示踪有着重要的影响^[9-10]。研究降雨过程中穿透降雨和树干茎流水稳定同位素和化学特征相对林外降雨的历时变化有助于探究冠层截留对其的影响以及植被截留的发生过程,从而为降雨在流域水文过程的示踪和冠层截留发展提供理论基础。

国内外关于冠层截留的研究主要集中于自然生长乔木^[11-12],而对修剪后矮化枣树的研究较少。矮化枣树(*Zizyphus jujube*)在黄土高原退耕还林区得到大面积的推广,枣树矮化不仅有利于管理,而且具有较大的水土保持和经济效益^[13]。但矮化后冠层形态特征、分支角度对降雨的分配过程和水化学特征的改变还有待于进一步研究。本文通过对林外降雨、穿透降雨、树干茎流历时过程连续取样以及稳定同位素和水化学特征分析,同时测定不同矮化枣树树干茎流率大小,探究矮化枣树截留特征及其对林外降雨历时过程稳定同位素和水化学特征的改变,为示踪剂在研究区果园的科学发展和水文生态效应提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于陕西省榆林市清涧县店则沟镇(37°15' N, 110°20' E),为典型的黄土丘陵沟壑区。该区属于温带半干旱大陆性季风气候,多年平均降水量为 505 mm,其中 70%的降水以大、暴雨的形式集中于 7—9

月,年均气温为 8.6℃(基于陕西省 1956—2006 年气象数据)。区域内土壤类型以粉砂壤为主,为典型的黄绵土地带。坡度为 20°~30°。主要的植被为管理良好的矮化红枣林和灌木丛,如铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、长茅草(*Stipa bungeana* Trin.)等。

1.2 研究方法

1.2.1 试验布设 在研究区选择一块树龄为 8 a 的矮化枣林地,枣树沿等高线以 3 m×2 m 的行株距种植,枝叶之间并无交叉。分别于 2016 年 9 月 17—18 日和 10 月 22—23 日选取同一棵枣树(树 1[#],表 1)进行穿透降雨(Tf_a 、 Tf_b)和树干茎流(Sf)随林外降雨历时过程研究。 Tf_a 为靠近枣树主干穿透降雨; Tf_b 为靠近枣树冠层边缘穿透降雨。其中 9 月 17—18 日前 10 d 内无降雨;10 月 22—23 日前 1 d 有 10 mm 降雨量。

同时另选取 4 棵长势良好的矮化枣树(树 2[#]~5[#],表 1),在每棵枣树主干上各布置一套树干茎流装置,研究试验区矮化枣树树干茎流率大小。取样时间为 2016 年 7—10 月。选取枣树的生长指标如表 1 所示。

表 1 选取矮化枣树基本特征

枣树 编号	树高/ m	枣树 面积/m ²	胸径/ cm	主要 分枝	叶面 积指数
1 [#]	2.25	2.54	5.8	4	0.80
2 [#]	1.70	0.99	5.3	3	0.80
3 [#]	2.45	1.45	5.1	2	0.72
4 [#]	1.70	2.76	9.5	3	1.35
5 [#]	3.05	2.74	10.5	4	1.10

1.2.2 截留装置的制作 林外降雨收集装置:在大口塑料漏斗(直径 20.5 cm)下连接一个聚乙烯软管,将降雨通过漏斗及软管导入体积为 2 L 的聚乙烯塑料瓶中,用玻璃胶密封空隙,并将该简易装置绑定在支架上,放置于林外空旷地以保证降雨收集不受到植被干扰,并将支架插入到土里,保持漏斗水平。

穿透降雨收集装置:另制作 2 个相同降雨收集装置,分别放置于枣树(树 1[#],表 1)冠层下靠近主干和边缘位置。

树干茎流收集装置:将纵向剖开的塑料水瓶环绕包裹在枣树的主干,同时在瓶底钻一个眼,粘上聚乙烯软管,软管的另一头连上 2 L 的聚乙烯瓶(枣树 2[#]~5[#]由于次降雨下树干茎流量较大,选取 5 L 的塑料油桶连接),随后用玻璃胶填充塑料瓶底端和主干的空隙。这样降雨就可以顺着树干流进塑料水瓶与主干之间的缝隙并通过聚乙烯软管流入到聚乙烯瓶内。详细信息参考刘章文等^[14]收集灌丛茎流的方法。

1.3 水样收集和分析

对于枣树 1[#]研究植被截留对降雨历时过程同位

素和水化学特征改变,水样收集方法为:降雨期间,根据降雨强度每隔一定的时间(15~60 min)连续收集矮化枣树(树 1[#])林外降雨、穿透降雨和树干茎流的水样。大强度降雨下间隔 15~30 min,小强度下间隔 30~60 min,避免水样从瓶中溢出,同时尽量保证在同一时刻收集各水样。将收集的水样倒入 100 mL 的小口聚乙烯瓶中,测量聚乙烯瓶质量的增量,换算成体积,即为收集到的水样的体积。根据漏斗横截面积将水样体积换算成水深,之后将水样带回实验室冷藏,以备稳定同位素和水化学特征的测定。取样时间为 2016 年 9 月 17—18 日和 10 月 22—23 日长历时典型降雨,便于降雨过程研究。

对于枣树 2[#]~5[#] 研究次降雨矮化枣树树干茎流率,水样收集方法为:2016 年 7—10 月每次降雨之后,测量矮化枣树(2[#]~5[#],表 1)树干茎流量以及林外降雨量。同时根据漏斗横截面积将水样体积换算成水深,计算得到不同降雨量下枣树树干茎流率。

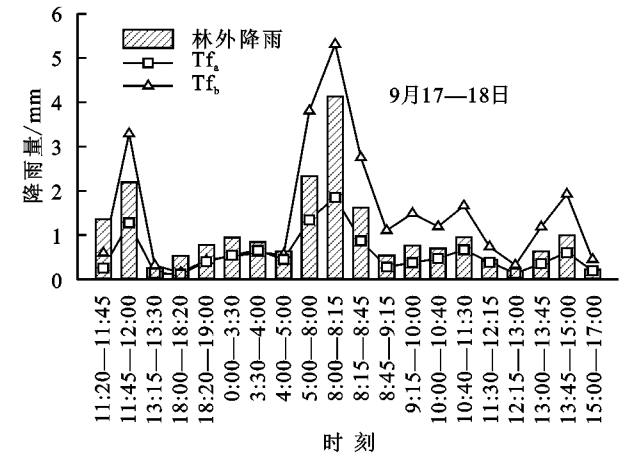
水样的稳定同位素成分和水化学性质均在西北农林科技大学旱区节水农业研究院测定。稳定同位素²H 通过水同位素分析仪(Los Gatos Research, LWA-45EP)测定,测样精度为 1‰。水样的²H 千分偏差(δ)通常是指样品的同位素比值相对于标准样品的同位素比值:

$$\delta = \frac{R_{\text{样}} - R_{\text{VSMOW}}}{R_{\text{VSMOW}}} \quad (1)$$

式中: $R_{\text{样}}$ 为样品中²H/¹H 值; R_{VSMOW} 为维也纳标准平均海水²H/¹H 值。

水样化学性质是基于离子交换吸附原理的液相离子色谱仪(Dionex, ICS-1100)进行测定,本文主要的测定 Cl⁻、SO₄²⁻。

树干茎流率计算公式为:



注:Tf_a 为靠近枣树主干穿透降雨;Tf_b 为靠近枣树冠层边缘穿透降雨。下同。

2.2 矮化枣树树干茎流率特征

2.2.1 树干茎流率随林外降雨历时变化 树干茎流

$$R_{sf} = \frac{V_{sf}}{1000 \cdot A \times P} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_{sf} 为树干茎流率; V_{sf} 为树干茎流体积量(cm^3); A 为枣树冠幅面积(m^2); P 为林外降雨量(mm)。

1.4 数据处理

利用 SPSS 19.0 统计软件对数据进行分析。采用多配对样本 Friedman 非参数检验对林外降雨、穿透降雨、树干茎流稳定同位素和水化学特征差异进行显著性检验($P < 0.05$),用 Pearson 相关性分析进行相关关系的评价。采用 SigmaPlot 12.5 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 穿透降雨量随林外降雨历时变化

两场降雨事件历时过程中,穿透降雨量随着林外降雨变化呈现相同的变化趋势(图 1),并呈显著正相关关系($R^2 > 0.86, P < 0.01$)。根据图 1 计算,2 场降雨事件历时过程不同位置穿透降雨(Tf_a 、 Tf_b)占林外降雨比例呈现空间变异,这主要是由于不同时期气象因子和树冠形态特征的差异造成的^[5]。

在降雨初始阶段,穿透降雨占林外降雨比例最低(图 1)。这主要是由于降雨初期,部分降雨用来湿润枝干、叶子,同时冠层上的截留雨水会有一定的蒸发。当达到冠层截留上限后,降雨会全部以穿透降雨的形式落到地面^[1]。此时冠层下某位置穿透降雨量并不会完全等同于林外降雨量(图 1),这主要是由于雨量筒上枝叶、主干的遮挡,雨水的撞击,导致冠层上的降雨并不会全部垂直降落^[15]。穿透降雨 Tf_a 和 Tf_b 的过程差异体现了枣树冠层对降雨的不均衡的分配过程。同时,穿透降雨量在部分时间阶段会大于林外降雨量(图 1),这主要是由于枝叶、主干呈现类似于“漏斗”的构造,导致其接受到更大面积的降雨^[16]。

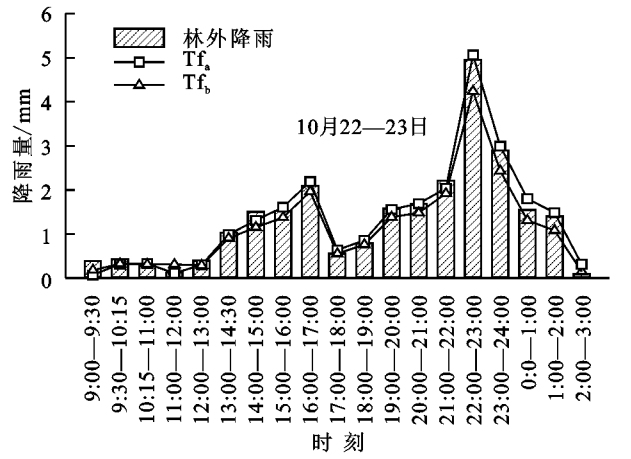
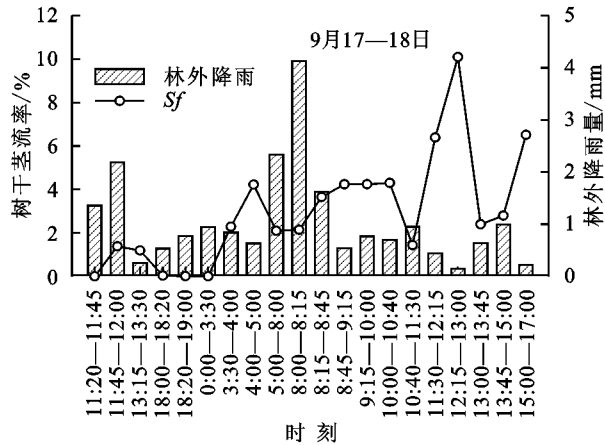


图 1 穿透降雨量随林外降雨历时变化

相对于林外降雨呈现出一定的滞后(图 2)。在降雨初始阶段,当降雨量分别达到 1.4 mm 和 1.2 mm,枣

树才产生树干茎流。只有当冠层枝干、树叶达到一定程度湿润,后续降雨才会沿着这些湿润的通道汇集到主干,形成树干茎流^[1]。同时,降雨最后时刻树干茎流率都有一个明显增大(图 2)。这是由于前期滞留在枝叶上的降雨补充、汇集,导致后一时段树干汇集更多的树干茎流量。



注: Sf 为枣树树干茎流。下同。

两场降雨事件树干茎流率分别为 2.3%, 3.5%。虽然树干茎流占林外降雨比例很小,但沿着植被主干汇集的树干茎流量却较大。9 月 17—18 日 8:00—8:15 时间段 4.1 mm 降雨可以产生 225 mL 树干茎流量。这部分树干茎流量可以沿着树木根系,绕过浅层土壤,达到对深层土壤的优势补给^[2]。

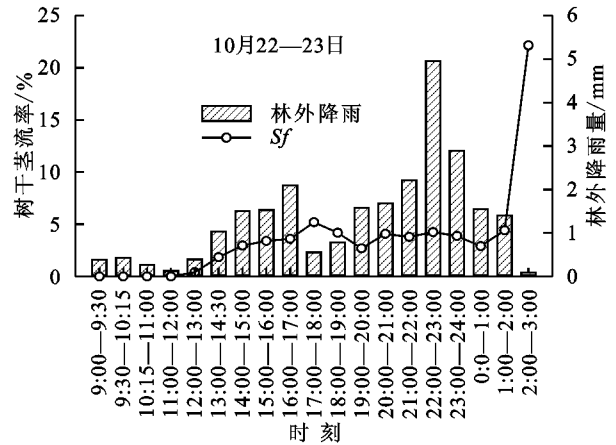


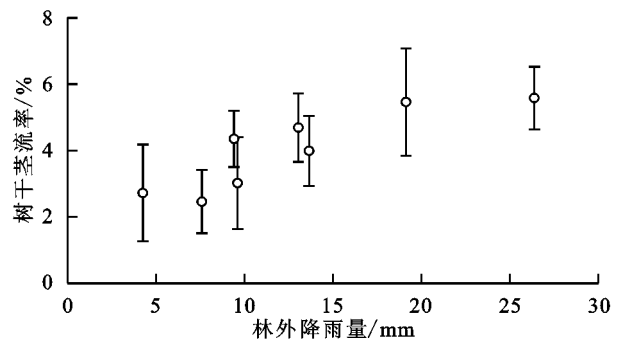
图 2 树干茎流率随林外降雨历时变化

2.2.2 次降雨矮化枣树树干茎流率变化 次降雨 4 棵矮化枣树的树干茎流率平均值随降雨量的增加呈现逐渐增加的趋势(图 3)。不同枣树的树干茎流率相差较大,这与其形态差异有关系^[14]。前期部分降雨饱和树干、枝叶,随着历时增加,降雨更容易沿着这些饱和通道汇集,因而呈现逐渐增加的树干茎流率。试验区矮化枣树的树干茎流率平均值可达 2.5%~5.6%。

2.3 穿透降雨和树干茎流稳定同位素值 $\delta^2\text{H}$ 随林外降雨历时变化

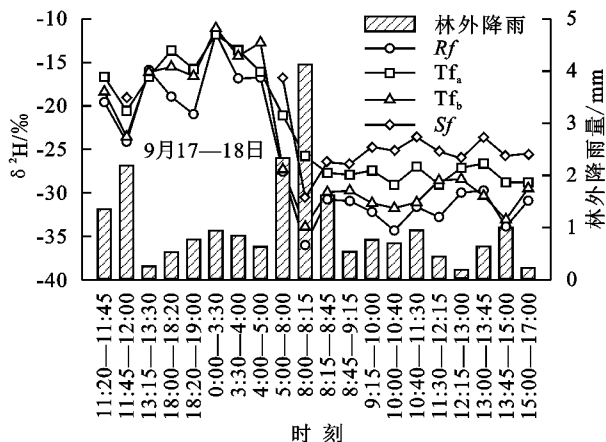
两场降雨事件历时过程中,穿透降雨(Tf_a 、 Tf_b),树干茎流(Sf)以及林外降雨(Rf)稳定同位素值 $\delta^2\text{H}$ 有着相同的变化趋势,且随降雨历时呈现逐渐贫化的趋势(图 4)。降雨历时过程中穿透降雨(Tf_a 、 Tf_b)、树干茎流(Sf)相对林外降雨有不同程度富集(图 4)。大气降雨过程中稳定同位素受到冷凝过程、温度等因

素的影响^[17],较富集的水汽容易冷凝降落,导致云团中水分子同位素逐渐贫化,这样降雨过程中同位素会越来越贫化^[18];同时截留过程中,穿透降雨和树干茎流的“滞后效应”导致其后期混合了前时段较富集的降雨。



注:误差棒为 4 棵枣树(2#~5#)的树干茎流率标准差。

图 3 矮化枣树树干茎流率随林外降雨量变化



注: Rf 为林外降雨。下同。

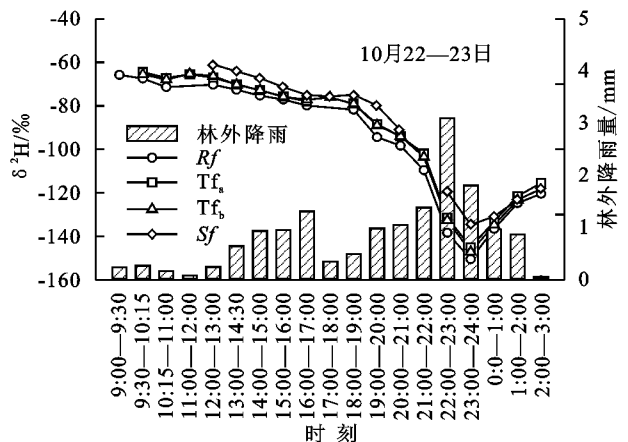


图 4 穿透降雨、树干茎流相对林外降雨稳定同位素 $\delta^2\text{H}$ 的历时变化

相对于降雨历时过程中的变化,植物冠层截留对林外降雨同位素的改变较小(表 2)。10 月 22—23 日穿透降雨和树干茎流的相对变化范围为 3.3‰~8.9‰(表 2),这表明截留过程对降雨稳定同位素有较明显的改变。2 场降雨事件中的林外降雨、穿透降雨、树干茎流的历时过程间均有极显著性差异($P<0.01$)。在 9 月 17—

18 日,虽然大部分时段穿透降雨 Tf_b 稳定同位素值 δ^2H 更富集,但是水量加权平均的结果却略微贫化(−0.5‰;表 2),这主要是由于此种情形穿透降雨量较林外降雨多(图 1),导致最终水量加权平均值偏贫化。其余各情形下,林外降雨经过植被截留后其水量加权平均值都呈现富集的结果(表 2)。

表 2 两场降雨事件历时过程穿透降雨和树干茎流相对林外降雨稳定同位素 δ^2H 大小

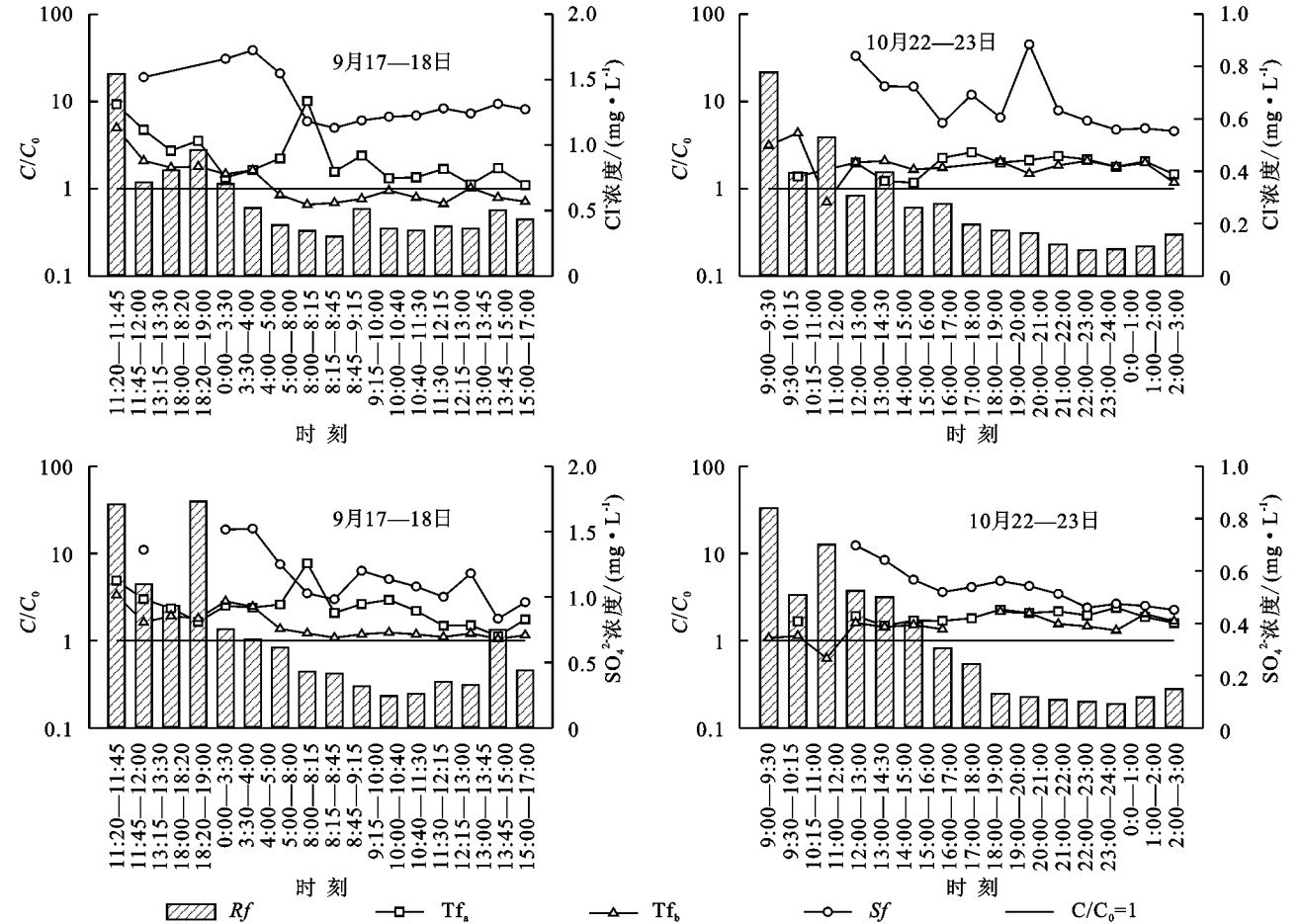
降雨时间	计算项目	$Rf/\text{‰}$	$Tf_a-Rf/\text{‰}$	$Tf_b-Rf/\text{‰}$	$Sf-Rf/\text{‰}$
9 月 17—18 日	算术平均值±标准差	-26.3 ± 7.4	3.7 ± 2.4	1.6 ± 1.5	6.6 ± 2.1
	水量加权平均值	−27.7	4.4	−0.5	5.5
10 月 22—23 日	算术平均值±标准差	-96.1 ± 28.3	4.0 ± 1.8	3.3 ± 1.6	8.9 ± 5.0
	水量加权平均值	−108.7	3.2	4.4	5.7

注:算术平均值为各时段 δ^2H 的简单平均值;水量加权平均值为各时段 δ^2H 乘以相对应水量后除以总水量的值,反映了整场降雨的 δ^2H 。

2.4 穿透降雨和树干茎流水化学特征(Cl^- 、 SO_4^{2-})随林外降雨的历时变化

两场降雨事件历时过程中的穿透降雨、树干茎流 Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度较林外降雨均有极显著性增加($P<0.01$),且随着降雨历时增加,其离子浓度逐渐接近林外降雨的浓度(图 5)。研究区位于黄土高原丘陵沟壑地带,表层土壤被不断的吹蚀,导致空中悬浮大量

固体尘埃。这些固体尘埃被植被枝叶所吸附,然后溶解于降雨中,从而导致截留后的降雨离子浓度增加^[19]。在降雨的初始阶段,冠层表面吸附的大量固体尘埃随降雨一起以穿透降雨和树干茎流的形式降落到地面。随着降雨的持续,枝叶被不断的淋洗冲刷,可被溶解矿物成分逐渐减少,导致截留水中的浓度逐渐趋近于林外降雨成分。



注:纵坐标(左)为穿透降雨(Tf_a 、 Tf_b),树干茎流(Sf)的离子(Cl^- 、 SO_4^{2-})浓度与林外降雨(Rf)的比值(C/C_0);纵坐标(右)为林外降雨离子(Cl^- 、 SO_4^{2-})浓度。

图 5 穿透降雨、树干茎流相对于林外降雨 Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度历时变化

两场降雨事件历时过程中,降雨经过植被截留后 Cl^- 、 SO_4^{2-} 算术平均值分别达到林外降雨 1.2~10.7 倍和

1.3~5.3 倍(表 2)。树干茎流 Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度较穿透降雨更大(图 5,表 3),这主要是由于树干茎流在植被冠层上有

更长的滞留时间,可增加水分蒸发时间而导致离子浓缩;同时更长的滞留时间也可使截留水更充分地淋溶枝干表皮及树叶上的矿物质成分,导致其水化学成分增加更

多^[20]。由于 10 月 22—23 日前一日降雨的发生导致枝叶、树干表面大部分干沉降物质已经被部分冲刷淋洗掉,因而截留水浓度增加小于 9 月 17—18 日(图 5,表 3)。

表 3 两场降雨历时过程穿透降雨和树干茎流相对林外降雨 Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 大小

降雨时间	水化学成分	计算项目	Rf/(mg·L ⁻¹)	Tf _a /Rf	Tf _b /Rf	Sf/Rf
9 月 17—18 日	Cl ⁻	算术平均值±标准差	0.6±0.3	3.0±2.8	1.4±1.1	13.3±10.8
		水量加权平均值	0.6	2.5	1.2	10.7
	SO ₄ ²⁻	算术平均值±标准差	6.9±4.7	2.7±1.6	1.6±0.7	7.1±5.8
		水量加权平均值	7.0	1.8	1.3	5.3
10 月 22—23 日	Cl ⁻	算术平均值±标准差	0.3±0.2	1.9±0.5	2.0±0.9	13.4±12.9
		水量加权平均值	0.2	1.6	2.0	10.3
	SO ₄ ²⁻	算术平均值±标准差	3.2±2.4	1.9±0.3	1.5±0.4	4.8±3.0
		水量加权平均值	2.3	1.5	1.4	3.9

注:算术平均值为各时段离子浓度的简单平均值;水量加权平均值为各时段离子浓度与相对应水量乘积后除以总水量的值,反映整场降雨的离子浓度。

3 讨论

许多冠层截留的模拟研究都需要林冠持水能力,达到饱和所需要的水量等因子^[21],其假设条件与降雨过程密切相关。该研究中 2 场降雨事件树干茎流开始产生所需的降雨量 1.4,1.2 mm 实为模型中树干持水能力;穿透降雨开始产生所需最小降雨量(<0.4 mm,图 1)为林冠持水能力。降雨发生过程的研究可以更好的为冠层截留模拟的发展和完善提供理论和数据的支持与印证。

研究区两场降雨矮化枣树树干茎流率为 2.3%~5.6%,在植被截留研究中不可忽略。而同处于黄土高原丘陵沟壑区苹果树树干茎流率不到 1%,常常被忽略^[5],这与苹果树的分枝角度大,降雨不容易沿着树干汇集有关。森林植被如油松林,华北落叶松等其树冠茎流率也只有 0.23%~3.1%^[22]。矮化的枣树相对于高大的乔木有着更高的树冠茎流率,这主要是由于研究区矮化枣树分枝角度小,降雨更容易汇集,路径更短造成的。这与 Iida 等^[23]的研究很类似,由于增加矮冠植被数量,以及其近乎垂直的分枝,导致了总树干茎流量的增加。

前人研究多表明,次降雨经过植被截留后,其同位素会较富集^[7]。本研究从降雨截留过程对这种现象进行印证:一方面,降雨过程同位素呈现逐渐贫化趋势(图 4),由于穿透降雨和树干茎流的“滞后效果”,导致最后一部分较贫化水分滞留在冠层上,所以会导致截留后总降雨更加富集;另一方面,当降雨撞击到植被冠层上时会形成大量小的雨滴,它们更加容易蒸发^[24],同时滞留在冠层上的雨水也会进一步蒸发,而较轻的水分子更易蒸发,剩下的是较重的富集的雨水,这样就导致截留后的降雨更加富集。树干茎流相对降雨有着更长的路径和发生过程,最终会导致其蒸发富集程度较穿透降雨更高(图 4、表 2),这和水化学特征规律相同。Kubota 等^[25]探究穿透降雨和树干茎流相对于林外降雨 δ²H 平均富集 2.8‰和 2.9‰,同时认

为不考虑到降雨过程同位素的变化以及植被截留影响会对流域储存的老水对树干茎流贡献产生 5%~10%的误差。本研究中,穿透降雨、树干茎流 δ²H 水量加权平均值相对林外降雨分别富集 -0.5‰~4.4‰,5.5‰~5.7‰(图 4、表 2),超过仪器的测量精度 1‰,不可忽略。同时本研究表明降雨过程中同位素有着较明显的变化,截留过程降雨同位素大小受到前时段降雨,以及截留过程进一步蒸发的影响(图 4)。降水过程同位素的简单算术平均值和水量加权平均值差异表明截留过程同位素的变化较次降雨的同位素变化更加明显(图 4,表 2)。这表明今后将同位素应用于研究区流域的降雨的示踪时需要考虑降水同位素变化以及植被截留对其影响。

本研究以 Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 来表征植被对降雨水化学特征的改变。降雨经过枣树截留后,Cl⁻ 浓度水量加权平均值可达林外降雨 1.2~10.7 倍,SO₄²⁻ 浓度为降雨 1.3~5.3 倍(表 3)。这与郎燕等^[26]研究结果类似,降雨经过冠层的淋溶后,其 Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 浓度明显增加,并且树干茎流增加较穿透降雨多。降雨历时越长,冠层截留对降雨化学特征改变越少(图 5)。次降雨经过植被截留后,大部分离子浓度都会增加,并且随着树干茎流量的增加其离子浓度会降低^[2]。氯离子质量平衡法是基于降水氯离子浓度示踪的地下水补给方法^[27],本研究表明植被截留对降水的 Cl 输入有着明显的改变,并且和降水历时有着较大关系(图 5),这表明在考虑降水对地表离子浓度的输入时,植被截留的作用是需要考虑的误差因子。

本研究的主要目标是回答次降雨过程中,树冠截留对降雨同位素和水化学特征是否会改变这个科学问题,并试图探究其影响因素。选择的 2 场降雨代表了该区次降雨的基本特征,因此得出的结果也应有一定的代表性,但对于其规律研究需要收集更多的次降雨来验证。

4 结论

(1)冠层的截留主要发生在降雨初始阶段,穿透降

雨和树干茎流相对于林外降雨有一定程度的滞后,树干茎流的这一现象尤其明显。由于研究区矮化的枣树枝与树干的角度较小,导致树干茎流率可达2.3%~5.6%,相对于高大的乔木有着更高的树干茎流率。这说明树枝角度以及矮化特征对降雨的截留有很大影响。

(2)降雨历时过程植物截留改变降雨稳定同位素和水化学特征。比较两场降雨历时过程穿透降雨和树干茎流同林外降雨稳定同位素和化学特征算术平均值可知,穿透降雨、树干茎流 $\delta^2\text{H}$ 分别富集1.6‰~4.0‰,6.6‰~8.9‰; Cl^- 浓度分别增加到林外降雨1.4~3.0倍和13.3~13.4倍; SO_4^{2-} 浓度分别增加到林外降雨1.5~2.7倍和4.8~7.1倍。树干茎流有着更长的路径和发生过程,其蒸发富集程度以及离子浓度较穿透降雨更高。截留过程降雨同位素受到前时段降雨以及截留进一步蒸发的影响,而水化学成分受到冠层截留影响逐渐削弱;相比次降水同位素和化学示踪剂成分改变,其历时过程的改变更大。本研究为同位素和水化学示踪剂运用于流域水文过程示踪以及植物的截留对降雨过程示踪剂的改变有较好的理论支持。

参考文献:

- [1] 杨文强,王艳萍,张青峰.黄土高原沟壑区苹果林冠截留特征[J].水土保持通报,2013,33(2):93-96.
- [2] Johnson M S, Lehmann J. Double-funneling of trees: Stemflow and root-induced preferential flow[J]. Ecoscience, 2006, 13(3):324-333.
- [3] 段旭,王彦辉,于澎涛,等.六盘山分水岭沟典型森林植被对大气降雨的再分配规律及其影响因子[J].水土保持学报,2010,24(5):120-125.
- [4] 高人,周广柱.辽宁东部山区几种主要森林植被类型林冠层对降雨的再分配作用[J].辽宁农业科学,2002(1):5-9.
- [5] 李晶晶,白岗栓.黄土丘陵沟壑区苹果树冠截留规律[J].应用生态学报,2013,24(2):379-387.
- [6] 贾永正,胡海波,张家洋.苏南丘陵区毛竹林冠截留降雨分布格局[J].生态学报,2011,31(12):3537-3542.
- [7] Brodersen C, Pohl S, Lindenlaub M, et al. Influence of vegetation structure on isotope content of throughfall and soil water[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(8): 1439-1448.
- [8] Ikawa R, Yamamoto T, Shimada J, et al. Temporal variations of isotopic compositions in gross rainfall, throughfall, and stemflow under a Japanese cedar forest during a typhoon event[J]. Hydrological Research Letters, 2011, 5(1):32-36.
- [9] Hoeg S, Uhlenbrook S, Leibundgut C. Hydrograph separation in a mountainous catchment-combining hydrochemical and isotopic tracers [J]. Hydrological Processes, 2000, 14(7): 1199-1216.
- [10] Ladouche B, Probst A, Viville D, et al. Hydrograph separation using isotopic, chemical and hydrological approaches (Strengbach catchment, France)[J]. Jour-

- nal of Hydrology, 2001, 242(3/4): 255-274.
- [11] 谭俊磊,马明国,车涛,等.基于不同郁闭度的青海云杉冠层截留特征研究[J].地球科学进展,2009,24(7): 825-833.
- [12] 罗跃初,韩单恒,王宏昌,等.辽西半干旱区几种人工林生态系统涵养水源功能研究[J].应用生态学报,2004, 15(6):919-923.
- [13] 白一茹.黄土丘陵区枣林土壤性质时空特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [14] 刘章文,陈仁升,宋耀选.祁连山典型高山灌丛树干茎流特征[J].应用生态学报,2011,22(8):1975-1981.
- [15] 康文星,邓湘雯,赵仲辉.林冠截留在杉木林生态系统能量转换过程中的作用[J].林业科学,2007,43(2): 15-20.
- [16] 李振新,郑华,欧阳志云,等.岷江冷杉针叶林下穿透雨空间分布特征[J].生态学报,2004,24(5):1015-1021.
- [17] Lee J E, Fung I. "Amount effect" of water isotopes and quantitative analysis of post-condensation process [J]. Hydrological Processes, 2008, 22(6): 1-8.
- [18] Bowen G J. Spatial analysis of the intra-annual variation of precipitation isotope ratios and its climatological corollaries[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2008, 113(D5)36-39.
- [19] 刘菊秀,温达志,周国逸.广东鹤山酸雨地区针叶林与阔叶林降水化学特征[J].中国环境科学,2000,20(3): 198-88.
- [20] Levia D F, Frost E E. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems[J]. Journal of Hydrology, 2003, 274(1/4): 1-29.
- [21] 王晓燕,鲁绍伟,杨新兵,等.北京密云油松人工林林冠截留模拟[J].西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(2):85-91.
- [22] 徐丽宏,时忠杰,王彦辉,等.六盘山主要植被类型冠层截留特征[J].应用生态学报,2010,21(10):2487-2493.
- [23] Iida Si, Tanaka T, Sugita M. Change of interception process due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak[J]. Journal of Hydrology, 2005, 315(1): 154-166.
- [24] Murakami S. A proposal for a new forest canopy interception mechanism: Splash droplet evaporation [J]. Journal of Hydrology, 2006, 319(1/4): 72-82.
- [25] Kubota T, Tsuboyama Y. Intra- and inter-storm oxygen-18 and deuterium variations of rain, throughfall, and stemflow, and two-component hydrograph separation in a small forested catchment in Japan[J]. Journal of Forest Research, 2003, 8(3): 179-190.
- [26] 郎燕,蔡体久,柴汝杉,等.不同类型原始红松林对降雨水化学特征的影响[J].水土保持学报,2012,26(2): 184-191.
- [27] 袁瑞强,龙西亭,王鹏,等.氯离子质量平衡法应用问题刍议[J].水文,2015,35(4):7-13,26.