

文章编号: 0455-2059(2013)06-0799-08

# 不同放牧情景下黑河上游亚高山草甸人工降雨截留特征

柳逸月<sup>1</sup>, 彭焕华<sup>2</sup>, 孟文平<sup>3</sup>, 别强<sup>2</sup>, 王阳<sup>1</sup>, 赵传燕<sup>1</sup>

1. 兰州大学 生命科学学院, 兰州 730000

2. 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000

3. 张掖市 寺大隆林场, 甘肃 张掖 734002

**摘要:** 采用人工降雨实验方法研究了黑河上游天老池小流域对放牧以及禁牧情况下亚高山草甸草地的人工降雨截留过程, 并用简易浸泡法测定了草地冠层最大持水能力。结果显示: 放牧干扰显著改变了亚高山草甸草地地表植被冠层特征和物种组成, 放牧草地与禁牧草地相比下冠层盖度、生物量和冠层株高分别减少了9%, 55%, 19.2 cm, 草地截留特征受不同冠层结构的影响产生一定差异。在一个给定降雨强度下, 草地冠层截留量先呈线性增加, 穿透雨出现后呈现指数增长, 其中禁牧草地出现穿透雨的人工降雨量为1.80 mm, 放牧草地的为1.10 mm。草地截留量随降雨强度的增加呈现先增加后减少的变化, 在0.7~0.8 mm/min 降雨强度级别下截留量最大, 草地截留率与降雨强度具有负幂函数关系。研究区草地冠层截留量较大, 使用人工降雨法在降雨强度级别为0.7~0.8 mm/min 下实测得到草地最大截留容量, 禁牧草地的为6.50 mm, 放牧草地的为5.17 mm。在降雨强度为<0.3 mm/min 时(研究区主要降雨强度), 实测禁牧草地饱和截留量为1.95 mm, 放牧草地的为1.29 mm。使用简易浸泡法测得禁牧草地截留容量为0.92 mm, 放牧草地的为0.65 mm。

**关键词:** 亚高山草甸草地; 冠层截留; 最大截留容量; 黑河上游**中图分类号:** Q143, Q948**文献标识码:** A

## Artificial rainfall interception characteristics in alpine meadows under different grazing scenarios in the upper reach of Heihe River

LIU Yi-yue<sup>1</sup>, PENG Huan-hua<sup>2</sup>, MENG Wen-ping<sup>3</sup>, BIE Qiang<sup>2</sup>,  
WANG Yang<sup>1</sup>, ZHAO Chuan-yan<sup>1</sup>

1. School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

3. Sidalong Forest Farm of Zhangye City, Zhangye 734002, Gansu, China

**Abstract:** The interception data from two categories of grazing scenario meadows (the grazing meadows and the grazing prohibition meadows) were collected under the artificial raining experiment with a different rainfall intensity and using a simple absorbent method to estimate the water storage capacity of these alpine meadows in Tianlaochi catchment in the upper reach of Heihe River. The results showed that disturbance of grazing had significantly changed the canopy characteristics and the species of subalpine meadow vegetation. Compared with the grazing-prohibition meadow, the canopy coverage, biomass and plant height of the grazing meadows decreased by 9%, 55% and 19.2 cm respectively. Influence by different canopy structures and characteristics, the interception characteristics of the different grazing scenario meadows showed certain differences. With a steadfast rainfall intensity, the interception processes of the alpine meadows were linearly increasing at first and, after the appearance of through fall (when the rainfall reached a value of 1.80 mm for the grazing prohibition

**收稿日期:** 2013-03-04; **修回日期:** 2013-05-29**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(91025015)**作者简介:** 赵传燕(1963—), 女, 山东曹县人, 教授, 博士研究生导师, 博士, e-mail: nanzhr@lzb.ac.cn, 研究方向为生态水文, 通信联系人。

and 1.10 mm for the grazing meadows), the interception presented an exponential increase. The relationship between the canopy interception ratio and interception rainfall in alpine meadows can be represented by a power function. The canopy interception of the alpine meadow in our study area could reach a high value. At the 0.7~0.8 mm/min rainfall intensity, the maximum rates of canopy interceptions (canopy storage capacity) for the grazing prohibition and grazing meadows were 6.50 mm and 5.17 mm. At the 0.3 mm/min rainfall intensity, which was similar to the realistic rainfall condition, the canopy interceptions for the grazing prohibition and grazing meadows were 1.95 mm and 1.29 mm. The canopy storage capacity measured by the simple storage absorbent method for the grazing prohibition and grazing meadows were 0.92 mm and 0.65 mm.

**Key words:** alpine meadow; canopy interception; water storage capacity; upper reach of Heihe River

植被的降水截留量在土壤—植被—大气连续体的水循环中是一个不可忽略的量,在大气降雨的重新分配中占较大比例,对于干旱、半干旱地区而言,它是水量平衡研究中的一项重要内容<sup>[1-2]</sup>。目前,对植被截留的研究多数集中在乔木和灌木上<sup>[3-6]</sup>,草地截留的相关研究较少且发展较慢,常在地区水量平衡的计算中被忽略不计。实际上,草地冠层截留量直接影响蒸发量及土壤水分的变化,与径流的产生也密切相关,在生态水文过程中占重要地位。国内外研究不同类型的草地对降雨量的截留率为13%~75%<sup>[7-11]</sup>。胡建忠等<sup>[2]</sup>对黑河上游祁连山区植被的冠层截留能力研究结果显示草地与灌丛的截留能力相差不大,最大截留率可达42.60%,尽管较林灌层截留量较小,但也是不可忽视的。因此,研究草地截留特征对正确评价黑河上游生态水文循环过程十分必要。

由于草地植株低矮,多匍匐贴地生长,截留观测实验的难度较大,因此对其截留特征的研究还较少<sup>[7,12]</sup>,主要集中在草地冠层截留容量的研究上<sup>[8,10-11]</sup>。植被冠层截留容量是植被截留过程中的一个重要参数,它代表了该冠层能截留的最大雨量<sup>[2-3]</sup>。对于草地冠层截留容量,胡建忠等<sup>[2]</sup>用浸泡法测定了退耕地花苜蓿及杂草的冠层容量。Yu等<sup>[11]</sup>,余开亮等<sup>[13]</sup>用水浸泡法测定亚高寒草甸的冠层持水容量。水浸泡法方便快捷,但破坏了植被的结构,只适用于测定冠层截留容量,不能反映在不同降雨条件下草地冠层的截留特征。在不破坏植被结构的情况下,水量平衡方法被认为是一种用于草地冠层截留容量观测较好的方法——通过模拟降雨,计算雨量与穿透雨的差值得到冠层截留容量。不同研究者对穿透雨的测量方法不一,如:Clark<sup>[10]</sup>和Beard<sup>[14]</sup>把草块切下放置于筛子或纱网上,然后测量进入到草块下方收集区域内的水量。Corbett等<sup>[15]</sup>,李春杰等<sup>[7]</sup>用橡胶封住地面,收集地表径流量来计算草地截留量。而Yu等<sup>[11]</sup>通过测定植被下方土壤水含量增加量,计算人工模拟降雨量与其中的差值得出草地冠层截留容量。

黑河流域是中国第二大内陆河流域,上游的祁连山区是该流域的水源区,位于水源区的森林草地生态系统生态过程与水文过程相互作用突出。由于人类活动,特别是20世纪70年代森林的砍伐和目前的过度放牧,森林草地受到较大干扰,植被涵养水源的功能下降。为了提高祁连山植被的生态服务功能,以森林恢复和禁牧措施为主的生态保护工作正在开展。水源区的生态保护计划势必导致植被格局及草地生长状况的变化,水文过程如何反映这些变化是摆在我们面前的一项重要课题。黑河上游草地截留特征与过程的实验观测是研究生态过程对水文过程影响的基础工作,对预测水文过程变化有重要意义。本研究以黑河上游天老池小流域亚高山草甸草地为研究对象,通过人工降雨方法对放牧和禁牧情况下草甸草地的降雨截留过程进行观测,并利用简易吸水法以及水量平衡法两种不同的方法测定了草地冠层截留容量。通过探讨黑河上游亚高山草地生态系统的降雨截留特征及其规律,为森林草地生态系统的生态水文过程模拟以及区域水量平衡计算研究提供科学实验依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黑河上游的天老池小流域(38°23'56"~38°26'47"N, 99°53'57"~99°57'10"E)。天老池小流域海拔2700~4440 m,面积12.8 km<sup>2</sup>,森林覆盖率65%,纵坡比降1:12.5,河流纵长6.0 km。该流域亚高山草甸草地主要分布在海拔2900~3100 m,主要种类为苔草(*Carex atrata* L.)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina* L.)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca* L.)、车前草(*Plantago asiatica* L.)等。该区域草地生态系统的主要人为干扰为放牧,放牧干扰强度按照李博<sup>[16]</sup>退化草地分级方法评价为轻度退化。放牧对草甸冠层及其土壤层具有较大影响<sup>[17]</sup>,造成了禁牧草地与放牧草地群落冠层结构产生了较明显的差异(表1)。

表 1 实验区两种放牧情景下草地样地的冠层属性

Table 1 Canopy properties of two grazing scenario meadow in the experimental plot						
植被类型	植被盖度/ %	冠层生物量/ (g/m <sup>2</sup> )	冠层高度/ cm	冠层结构		
				物种	生物量在总生物量中的占比/%	平均株高/cm
禁牧草地	98±0.8	464.89±20.42	25.0±1.5	苔草	56.53	25.0
				车前草	9.05	10.0
				二裂委陵菜	31.17	15.2
放牧草地	89±5.3	211.23±15.13	5.8±2.1	苔草	30.67	6.8
				车前草	23.53	5.3
				鹅绒委陵菜	40.79	4.2

禁牧草地从2011年6月开始已有1年多的围栏封育恢复历时,优势种为苔草、二裂委陵菜以及车前草,具有较复杂的群落结构.冠层上层主要由以苔草为主的禾本科植物组成,叶片交叠、密度较大;下层主要由委陵菜属、车前草、蒲公英等叶面积较大的呈匍匐状或莲座状的植株构成.在此群落中,禾本科高度较高,茎秆占植株生物量比例较大,成熟叶片较多.

放牧草地以苔草、车前草、鹅绒委陵菜为优势种,其群落冠层高度较为低矮,由莲座状的车前草以及匍匐状的鹅绒委陵菜组成.此群落中苔草因放牧高度较低,茎秆占植株生物量比例较小,成熟叶片较少.

1.2 实验设计

1.2.1 降雨装置

本实验使用自制野外人工模拟降雨装置以及截留观测装置(示意图见图1).人工模拟降雨装置由喷头体和控压装置部分组成.调节控压装置以及喷头高度可以获得不同的降雨强度( $P_r$ ).截留观测装置由碎流挡板、支撑架、安置草块的筛子(14目,  $\phi=20$  cm)、集水漏斗( $\phi=20$  cm)以及量筒(精度0.2 mL)四部分组成.实验进行时,草块安置架设在集水漏斗上的筛子中,筛子与漏斗置于

支撑架顶端,集水漏斗收集的穿透雨流入置于下方的量筒,可以方便地在人工降雨过程中随时进行读数.该装置共3套,2套用于截留实验读数得到穿透雨数值,1套作对照组用于读取降雨量数值.

1.2.2 样品采集与处理

实验于2012年7–8月进行,期间为草地生物量较大的月份(表1),处于结实期—果后营养期—枯黄期阶段.在禁牧区以及放牧区分别布设6 m×6 m的样地(表1为样地基本概况),在样地内随机采样.采样时使用锋利的剪刀紧贴地面采集直径为20 cm的圆形草块,在不破坏冠层原状的前提下去掉底层土块以及大部分枯落物.草块经以上处理后,使用电子天平(精度0.01 g)测定鲜重生物量,使用数码拍摄法<sup>[18]</sup>测定盖度.最后将草块置于人工降雨装置中进行人工降雨实验.

1.2.3 人工降雨过程与控制

实验期间平均气温11.33℃,月均降雨量23.6 mm,相对湿度76%,平均风速0.92 m/s,平均太阳辐射量185.4 (W·h)/m<sup>2</sup>.人工降雨过程中,每隔1 min对降雨量( $R$ )和穿透雨量进行记录,最后通过降雨量与穿透雨量的差值计算截留量( $I$ ).本实验按照不同降雨强度等级(1.0~1.2, 0.7~0.8, 0.5~0.6, 0.3~0.4, <0.3 mm/min)与降雨历时(20, 30 min)组合进行人工降雨截留实验,每一个历时与降雨强度等级组合下进行3个重复实验,取其平均值.

1.2.4 简易浸泡法测定冠层最大截留容量

使用人工降雨法进行截留量的测定后,对样品采用简易浸泡法测定冠层最大截留容量(又称冠层持水能力,  $I_c$ ).方法步骤如下:人工降雨后,将草块样品从筛子取出浸入水中,10 min后轻轻捞出,等枝叶上水珠不再下滴时称重,获得最大吸水时的样品总质量( $M$ ),2次质量的差值则为样品饱和和持水量,将饱和持水量转换成水深得到样品的

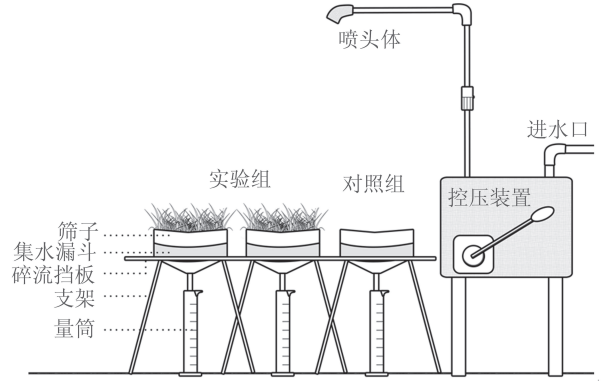


图 1 人工降雨装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of artificial rainfall equipment

最大截留容量. 具体计算见式(1),

$$I_C = \frac{(M - FW)}{31.4}. \quad (1)$$

其中, 31.4 为水的质量转换为降雨水深的参数.

### 1.3 数据分析

得到的所有实验数据在 Excel 2007 中进行整理以及基础运算, 后运用 SPSS 18.0 统计软件以及 Sigmaplot 11.0 进行相关回归拟合, 显著性水平设定为  $\alpha=0.05$ .

## 2 结果分析

### 2.1 两种情景下草地人工降雨截留过程

草地冠层在穿透雨出现之前将截留全部降雨, 此阶段截留量与降雨量基本相等(即  $I = R$ , 截留率为 100%), 两者呈线性正相关. 随着降雨历时延长, 降雨量增加, 出现穿透雨, 冠层截留仍呈持续增加的趋势, 但增加幅度逐渐减缓, 最后趋向稳定.

#### 2.1.1 穿透雨的出现

图 2-3 为放牧与禁牧 2 种情况下草地冠层在不同降雨强度下的截留过程. 通过对截留率的分析获得: 当降雨量大于 1.80 mm 时, 禁牧草地出现穿透雨, 当降雨量大于 1.10 mm 时, 放牧草地出现穿透雨, 前者为后者的 1.63 倍. 两者的差异主要受草地冠层结构差异的影响. 草地冠层是一个由多层次多物种组成的立体结构, 降雨截留开始后在叶面承托力和表面张力等的作用下, 水分子以串珠状在其上层叶面密集分布<sup>[7, 11]</sup>, 随着降雨量的持续增加, 上层叶面承托力不足以抵消水滴的重力时, 水滴向冠层下层逐层穿透. 同样, 在下层叶面承托力不足以抵消水滴的重力时, 水滴继续向下穿透运移到达地面形成穿透雨. 禁牧草地的冠

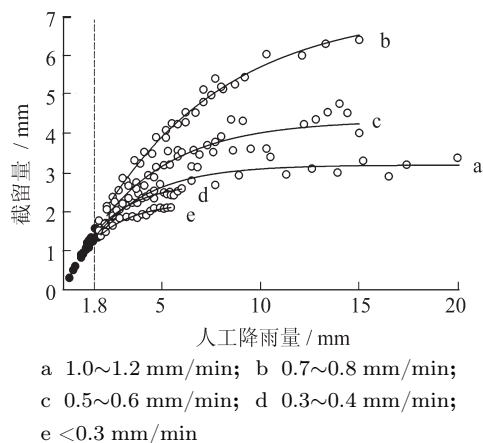


图 2 禁牧草地人工降雨截留过程

Figure 2 Artificial rainfall interception processes of the grazing prohibition meadow

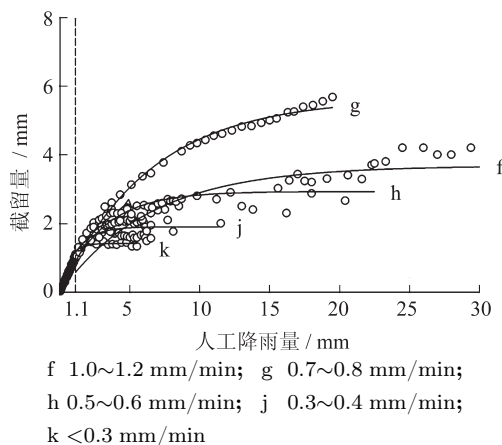


图 3 放牧草地人工降雨截留过程

Figure 3 Artificial rainfall interception processes of the grazing meadow

层高度大(表 1), 上层由禾本科植物的叶片交叠组成, 密度较大, 下层由叶面积较大的呈匍匐状或莲座状的植株构成. 放牧草地的冠层高度小, 缺失高密度的禾本科叶片层, 放牧草地对雨滴冲击的缓冲能力以及叶表面对雨滴的吸附量都要低于禁牧草地的, 因此其产生穿透雨所需的降雨量要小于禁牧草地的.

#### 2.1.2 穿透雨出现后

穿透雨出现后, 草地冠层截留呈动态变化的过程. 前人在对植被冠层降雨截留动态过程研究中指出, 1 次降雨过程中冠层截留只出现 1 次峰值, 随后在该值波动<sup>[5]</sup>. 本文也得到相同的结果, 在相同降雨强度下, 2 种情景下草地冠层截留量均随降雨量的增加而增加, 当降雨量增加到一定程度时, 穿透雨离开冠层的速率与降雨量进入冠层的速率达到动态平衡, 截留量达到该降雨强度的稳定峰值. 对不同降雨强度下载留量( $I$ )与降雨量( $R$ )进行回归分析, 发现以指数函数拟合最适合(表 2-3), 拟合方程中草地冠层饱和截留量稳定值较实验中的实测值偏大.

由表 2-3 可知禁牧草地的截留量要大于放牧草地的. 从前人对草地冠层容量的研究中可知, 冠层生物量的大小对截留容量有重要影响<sup>[13, 19-21]</sup>. 物种构成<sup>[13]</sup>以及层状结构的差异<sup>[8, 11, 19]</sup>也是影响截留容量的重要因素. Merriam<sup>[20]</sup>研究发现未放牧的草地截留容量比过度放牧草地的高 50%. Couturier 等<sup>[8]</sup>指出放牧显著减少 LAI 和生物量, 因而相应的草地冠层截留容量显著减少, 与本文结果相似. 本研究中, 禁牧草地生物量为放牧草地的 2 倍左右, 因此对降雨具有更大的截留作用, 但其截留量并未随生物量呈 2 倍增长. 产生这个结果的

原因是2种情景下草地的物种组成不同. 根据相关研究可知<sup>[13]</sup>, 单位生物量下鹅绒委陵菜持水能力为车前草的1.2倍, 为二裂委陵菜以及禾本科植物的2倍多. 禁牧草地87%的物种为单位生物量截留持水能力较小的苔草以及二裂委陵菜, 而放牧

草地中63%的物种由单位生物量截留容量较大的鹅绒委陵菜以及车前草组成. 尽管禁牧草地的生物量是放牧草地的2倍, 但因其冠层物种单位生物量持水能力较弱, 导致其截留量偏高于放牧草地的, 而并未达到放牧草地的2倍.

表 2 不同降雨强度级别下, 禁牧草地截留量与降雨量的回归方程

Table 2 Regression equations between interception and the precipitation in different rainfall intensity of the grazing prohibition meadow

编号	雨强级别/ (mm/min)	拟合方程	$R^2$	$P$	$SEE$	$F$	实测饱和 截留量
a	1.0~1.2	$I = 3.196(1 - e^{-0.3454R})$	0.829 2	< 0.000 1	0.242 9	72.83	2.98
b	0.7~0.8	$I = 7.216(1 - e^{-0.1568R})$	0.984 5	< 0.000 1	0.173 1	825.49	6.50
c	0.5~0.6	$I = 4.339(1 - e^{-0.2610R})$	0.836 4	< 0.000 1	0.306 0	92.02	3.87
d	0.3~0.4	$I = 2.742(1 - e^{-0.4713R})$	0.930 7	< 0.000 1	0.083 8	214.99	2.24
e	<0.3	$I = 2.236(1 - e^{-0.5215R})$	0.956 2	< 0.000 1	0.049 3	283.78	1.95

$I$  为禁牧草地截留量,  $R$  为降雨量, 下同.

表 3 不同降雨强度级别下, 放牧草地截留量与降雨量的回归方程

Table 3 Regression equations between interception and the precipitation in different rainfall intensity of the grazing meadow

编号	雨强级别/ (mm/min)	拟合方程	$R^2$	$P$	$SEE$	$F$	实测饱和 截留量
f	1.0~1.2	$I = 3.681(1 - e^{-0.1549R})$	0.680 2	< 0.000 1	0.537 0	57.42	3.40
g	0.7~0.8	$I = 5.646(1 - e^{-0.1557R})$	0.988 0	< 0.000 1	0.141 8	2 137.10	5.17
h	0.5~0.6	$I = 2.930(1 - e^{-0.3375R})$	0.700 8	< 0.000 1	0.310 5	98.37	2.22
j	0.3~0.4	$I = 1.863(1 - e^{-0.9144R})$	0.505 4	< 0.000 1	0.180 1	51.10	1.65
k	< 0.3	$I = 1.422(1 - e^{-1.6301R})$	0.692 5	< 0.050 0	0.0776	10.14	1.29

2.2 两种情景下草地冠层截留量与降雨强度的关系

从图2-3中可知, 在穿透雨出现前, 截留量的增加不受降雨强度大小的影响, 均随着降雨量的增加呈线性增长. 不同降雨强度大小只会影响穿透雨出现的时间, 不同降雨强度级别下, 禁牧草地出现穿透雨的时间为1~6 min, 对应降雨量为1.5~2.2 mm; 放牧草地出现穿透雨时间的为0~4 min, 对应降雨量为0.6~1.5 mm. 而出现穿透雨后, 草地冠层的截留量变化不仅与降雨量以及降雨历时有关, 降雨强度对其的影响也十分显著. 李春杰等<sup>[7]</sup>研究表明草甸截留量与降雨强度呈正相关关系, 在一定降雨强度范围内截留量随降雨强度的增加而增加, 随后其增加幅度减小并趋向稳定. 但本文结果显示, 在一定降雨强度范围内(降雨强度<0.7 mm/min), 草地冠层的截留量随降雨强度增加而增加(禁牧草地中b>c>d>e, 放牧草地中g>h>j>k), 但超过一定降雨强度范围后(1.0~1.2 mm/min), 截留量会有所下降(图2a, 3f), 其变化动态略有差异.

对两种草地来说, 在冠层未达到其饱和截留

量时, 在较小的降雨强度级别下的截留量均比最大降雨强度组大(禁牧草地<0.4 mm/min, 放牧草地<0.6 mm/min), 在0.7~0.8 mm/min降雨强度级别下均获得了最大的饱和截留量. 原因可能是: 在不同降雨强度级别下雨滴的形态大小以及密度不尽相同<sup>[12, 21-22]</sup>, 在降雨量相等的情况下, 较大的降雨强度使冠层叶面所受的冲击力较大, 不利于雨水的吸附和储存, 叶面部分截获的雨滴也会因扰动作用而脱落. 反之, 降雨强度较小时, 叶面可以均匀湿透, 截留量相应增大. 而本实验中人工降雨的雨滴形态可能以0.7~0.8 mm/min的降雨强度级别为分界点, 当小于该降雨强度时, 雨滴较小, 只是雨滴密度大; 当大于该降雨强度时雨滴变大, 造成了较强的冲击力, 对冠层持水的扰动增大而使截留量相应减小. 另一个对截留量造成影响的重要因素是蒸发, 除了植被冠层截留的水分, 蒸发量作为附加截留量也同样算进总截留量里<sup>[23]</sup>. 一般来说, 对历时短、降雨强度大的连续降雨可使冠层截留达到饱和状态, 而小降雨强度、长历时或间歇性降雨, 蒸发作用可能会导致降雨与冠层截留的非饱和关系<sup>[24]</sup>. 因此在本实验中, 在不同降雨强度下出现的不同饱和截留量差异, 其中一部分



应是在不同降雨强度条件下附加截留量的比重不同导致了截留量表现出差异,关于这一点有待进一步研究。

为了更直观分析降雨强度对草地冠层截留的影响,我们以单次人工降雨事件的降雨强度和该次降雨的最终截留量拟合了2种放牧情景下草地冠层截留量( $I$ )与降雨强度( $P_r$ )的回归关系(图4)。从图4中可以看出,截留量随着降雨强度的增大先增加后减少,以二项式拟合较为合理,其中禁牧草地的回归方程为

$$I = -14.95P_r^2 + 23.05P_r - 3.38, \\ R^2 = 0.7633, P < 0.001;$$

放牧草地的回归方程为

$$I = -6.93P_r^2 + 11.37P_r - 0.71, \\ R^2 = 0.6681, P < 0.001.$$

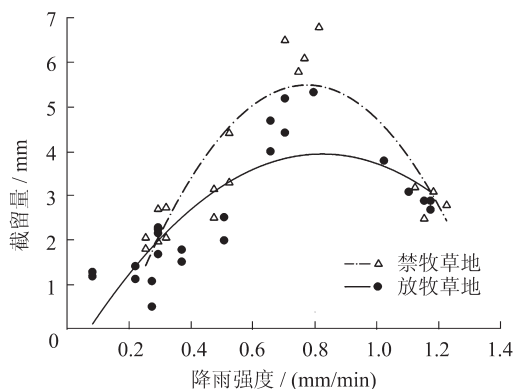


图4 2种放牧情景下草地冠层稳定截留量与降雨强度的关系

Figure 4 Regression relationship between interception and rainfall intensity in two grazing scenario meadows

由回归曲线可见,两种草地冠层截留量均在降雨强度为0.7~0.8 mm/min时达到峰值,随后下降。禁牧草地冠层截留量随降雨强度变化的幅度要大于放牧草地的,且达到峰值降雨强度前在相同降雨强度下其截留量也比放牧草地的要大。但降雨强度级别为1.0~1.2 mm/min时,由于该降雨强度级别下雨滴直径较大,对于禁牧草地来说,尽管其生物量较大,但其上层禾本科叶倾角较小,下层也因生长自疏作用较放牧草地稀疏,对大直径雨滴冲击的承受能力较差,造成其截留容量与放牧草地相差不大甚至略低。

### 2.3 2种情景下草地冠层截留率与降雨强度的关系

植被冠层截留率和降雨量之间存在着负相关性,随着降雨量的增大表现出阶段性的变化,分为

快速下降阶段、缓慢下降阶段和相对稳定阶段,呈负幂函数关系<sup>[7, 25-27]</sup>。在本研究中由于人工降雨历时一致,因而降雨量与截留率之间的关系可用降雨强度与截留率之间的变化来表示。从图5可以看出,我们的研究结果与大多数研究一样,负幂函数能较好地拟合截留率( $I_R$ )与降雨强度( $P_r$ )的回归关系。禁牧草地的拟合方程为

$$I_R = 0.2265P_r^{-0.5144}, \quad R^2 = 0.596, P < 0.0001;$$

放牧草地的拟合方程为

$$I_R = 0.1704P_r^{-0.4634}, \quad R^2 = 0.790, P < 0.0001.$$

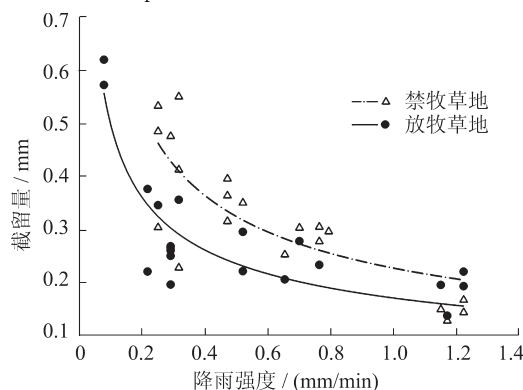


图5 2种放牧情景下草地冠层截留率与降雨强度的关系

Figure 5 Regression relationship between interception ratio and artificial rainfall intensity in two grazing scenario meadows

从图4中可看出放牧草地在降雨强度较小时的截留率约为禁牧草地的75%,在1.0~1.2 mm/min大降雨强度级别下两者截留率相差不大,禁牧草地的截留率甚至略有偏低。

使用相同人工降雨法下,李春杰等<sup>[7]</sup>测定了青藏高原冠层盖度为82%的草地截留容量值为0.18~0.61 mm,截留率小于16%。与其结果相比本文得到了更大的截留量以及截留率。首先因为本研究区草地冠层具有更高的盖度、生物量以及冠层高度(表1),因而有更大的截留量。其次,由于本研究均在水平的装置上进行观测实验,去除了地形造成的冠层不均匀<sup>[28]</sup>以及冠层接受降雨冲击的不均匀导致聚集水滴受角度影响而滴落等因素,使草地冠层能够聚集更多的降雨。最后,实验地点的不同,造成太阳辐射、空气湿度以及风速等差异影响了附加截留量而导致结果的差异。

### 2.4 不同测量方法下2种草地冠层容量的比较

从图6中可以看出,用人工降雨法(即依据水量平衡原理的方法)测出的草地冠层的截留容量远大于用简易浸泡法测定的结果。其中,简易浸

泡法测出的禁牧草地以及放牧草地的截留容量(图6c)分别是 $0.92 \pm 0.19$  mm,  $0.65 \pm 0.16$  mm. 人工降雨法因其选择的降雨强度不同,测出的截留容量不同,0.7~0.8 mm/min 降雨强度级别下测量禁牧草地与放牧草地冠层的截留容量(图6a)分别为简易浸泡法的7.0, 7.9倍,降雨强度级别 $< 0.3$  mm/min 下测量结果(图6b)分别约为简易浸泡法的2.1, 2.0倍.

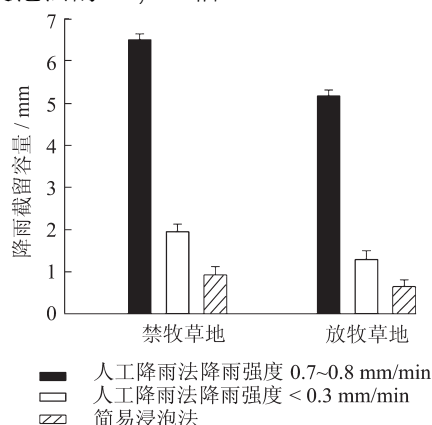


图6 不同测量方法的禁牧草地与放牧草地冠层截留容量

Figure 6 Canopy rainfall storage capacity by different measure method of rainfall intensity

草地冠层截留水分的差异主要受植被盖度、生物量以及群落配置这些冠层特性的影响. Couturier 等<sup>[8]</sup>分别用简易浸泡法和模拟降雨法测得加拿大草地( $LAI$  为  $4.7 \text{ m}^2/\text{m}^2$ )截留容量分别为 1.23, 1.09 mm. Thurow 等<sup>[19]</sup>用水量平衡法测得美国垂穗种群(地上生物量 149 g)和黑拉禾种群(地上生物量 364 g)截留容量分别为 1.0, 1.8 mm. 本文使用简易浸泡法与水量平衡法测得的截留容量较上述结果偏大,可能是由于本研究区草地具有更高的地上生物量以及冠层盖度.

除了冠层特征的影响,草地冠层截留容量受测定方法的影响也存在一定的差异. 一些研究者曾对同种植被分别使用简易浸泡法以及水量平衡法测定其截留容量以比较这两种方法. 在彭焕华等<sup>[4]</sup>以及 Couturier 等<sup>[8]</sup>的研究中,简易浸泡法对于植被冠层截留容量的测量要高于水量平衡法的,其原因因为简易浸泡法较水量平衡法具有更大的降雨接触面积<sup>[29]</sup>,无降雨动态截留过程中风的扰动<sup>[30]</sup>,无雨滴尺寸对冠层造成的冲击扰动等影响<sup>[12, 22]</sup>. 而 Garcia 等<sup>[29]</sup>以及 Keim 等<sup>[31]</sup>的研究结果与之相反,认为简易浸泡法忽略了冠层结构对水的液滴凝结作用,植株叶腋、茎腋处对水的汇集储存以及降雨过程中蒸发造成的截留损失. 本文

结果与后者相同.

人工降雨强度不同会对其截留量有明显影响,也影响到截留容量的测定结果. 本研究在 0.7~0.8 mm/min 降雨强度级别下测量的结果可视作草地冠层的潜在最大截留容量,但自然降雨情况下一般较少达到长时间保持如此大降雨强度. 在研究区的现实自然降雨条件下,降雨强度一般处于 $< 0.3$  mm/min 的级别,因此该降雨强度级别下测出截留容量更具有现实应用意义. 因此我们建议,研究者在使用水量平衡法对截留容量进行测定时,应针对不同植被使用相应的降雨强度以保证测定数据的可用性.

### 3 结论

本实验中草地冠层截留量动态变化在降雨过程中分成两个阶段: 1) 穿透雨出现前的线性增长阶段,禁牧草地和放牧草地出现穿透雨的雨量分别为 1.80, 1.10 mm; 2) 穿透雨出现后的指数增长阶段,在一个给定降雨强度下,截留量增加的速率减缓,最终在一个稳定值上下波动.

在不同人工降雨强度级别下,草地冠层具有不同的饱和截留量. 截留量并非随降雨强度增大而增大,在某个降雨强度下出现最大截留容量后,随着降雨强度的继续增大会呈下降趋势. 原因是不同降雨强度下雨滴形态、蒸发条件等多种因素,这也将是我们进一步研究的内容.

本研究区草地冠层截留量较大,使用人工降雨法实测得到禁牧草地截留容量为 6.50 mm,放牧草地的为 5.17 mm. 接近研究区现实降雨强度级别( $< 0.3$  mm/min)下,实测禁牧草地饱和截留量为 1.95 mm,放牧草地的为 1.29 mm. 使用简易浸泡法得到禁牧草地的截留容量为 0.92 mm,放牧草地的为 0.65 mm. 草地冠层较高的截留量对流域的蒸发量有重要影响,因而确定草地冠层截留容量及其截留特征将可以为我们下一步进行草地截留模拟提供科学依据.

### 参考文献

- [1] 张志山, 张景光, 刘立超, 等. 沙漠人工植被降水截留特征研究[J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 761–766.
- [2] 胡建忠, 李文忠, 郑佳丽, 等. 祁连山南麓退耕地主要植物群落植冠层的截留性能[J]. 山地学报, 2004, 22(4): 492–501.
- [3] TROMBLE J. Water interception by two arid land shrubs[J]. Journal of Arid Environments, 1988, 15(1): 65–70.

- [4] 彭焕华, 赵传燕, 许仲林, 等. 祁连山青海云杉林冠持水能力[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2233–2239.
- [5] 赵鸿雁, 吴钦孝. 黄土高原人工油松林林冠截留动态过程研究[J]. 生态学杂志, 2002, 21(6): 20–23.
- [6] 刘向东, 吴钦孝, 赵鸿雁. 黄土丘陵区人工油松林和山杨林林冠截留作用的研究[J]. 水土保持通报, 1991, 11(2): 4–7.
- [7] 李春杰, 任东兴, 王根绪, 等. 青藏高原两种草甸类型截留特征分析[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 769–774.
- [8] COUTURIER D, RIPLEY E. Rainfall interception in mixed grass prairie[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1973, 53(3): 659–663.
- [9] BEARD J. Rainfall interception by grass[J]. South African Forestry Journal, 1962, 42(1): 12–5.
- [10] CLARK O R. Interception of rainfall by prairie grasses, weeds and certain crop plants[J]. Ecological Monographs, 1940, 10(2): 243–277.
- [11] YU K, PYPKER T G, KEIM R F, et al. Canopy rainfall storage capacity as affected by subalpine grassland degradation in the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(20): 3114–3123.
- [12] CALDER I R. Rainfall interception and drop size-development and calibration of the two-layer stochastic interception model[J]. Tree Physiology, 1996, 16(8): 727–732.
- [13] 余开亮, 陈宁, 余四胜, 等. 物种组成对高寒草甸植被冠层降雨截留容量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5771–5779.
- [14] BEARD J. Results of the mountain home rainfall interception and infiltration project in Black Wattle, 1953/54[J]. Journal of the South African Forestry Association, 1956, 27(1): 72–86.
- [15] CORBETT E S, CROUSE R P. Rainfall interception by annual grass and chaparral losses compared[R]. California: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 1968: 12.
- [16] 李博. 中国北方草地退化及其防治对策[J]. 中国农业科学, 1997, 30(6): 19.
- [17] 谈嫣蓉, 杜国祯, 陈懂懂, 等. 放牧对青藏高原东缘高寒草甸土壤酶活性及土壤养分的影响[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2012, 48(1): 86–91.
- [18] WHITE M A, ASNER G P, NEMANI R R, et al. Measuring fractional cover and leaf area index in arid ecosystems: digital camera, radiation transmittance, and laser altimetry methods[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(1): 45–57.
- [19] THUROW T, BLACKBURN W, WARREN S, et al. Rainfall interception by midgrass, shortgrass and live oak mottes[J]. Journal of Range Management, 1987, 40(5): 455–460.
- [20] MERRIAM R A. Surface water storage on annual eelgrass[J]. Journal of Geophysical Research, 1961, 66(6): 1833–1838.
- [21] CHAPMAN G. Size of raindrops and their striking force at the soil surface in a red pine plantation[J]. Transactions of American Geophysical Union, 1948, 29: 664–670.
- [22] CALDER I R. Canopy processes: implications for transpiration, interception and splash induced erosion, ultimately for forest management and water resources[J]. Plant Ecology, 2001, 153(1/2): 203–214.
- [23] 孔繁智, 宋波, 裴铁璠. 林冠截留与大气降水关系的数学模型[J]. 应用生态学报, 1999, 1(3): 201–208.
- [24] 张卓文, 杨志海, 张志永, 等. 三峡库区莲峡河小流域马尾松林冠降雨截留模拟研究[J]. 华中农业大学学报, 2006, 25(3): 318–322.
- [25] 荐圣淇, 赵传燕, 方书敏, 等. 黄土高原丘陵沟壑区柠条和沙棘灌丛的降雨截留特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2383–2389.
- [26] 刘章文, 陈仁升, 宋耀选, 等. 祁连山典型灌丛降雨截留特征[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1337–1346.
- [27] KOMATSU H, SHINOHARA Y, KUME T, et al. Relationship between annual rainfall and interception ratio for forests across Japan[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256(5): 1189–1197.
- [28] 刘旻霞, 王刚, 盛红梅. 高寒草甸阳坡—阴坡梯度上环境因子特征及其与地上生物量和物种丰富度的关系[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2013, 49(1): 76–81.
- [29] GARCIA E P, ALONSO B N, ALEGRE J. Water storage capacity, stemflow and water funneling in Mediterranean shrubs[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(3/4): 363–372.
- [30] DUNKERLEY D. Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation: a brief review and evaluation of available research strategies[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(4): 669–678.
- [31] KEIM R F, SKAUGSET A E, WEILER M. Storage of water on vegetation under simulated rainfall of varying intensity[J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(7): 974–986.

(责任编辑: 王春燕)