

海拔和坡向对高寒灌丛草甸凋落物水源涵养功能的影响

吕宸¹, 龚伟¹, 车明轩¹, 康成芳^{1,2}, 许蔓菁¹, 吴强³, 宫渊波¹

(1.四川农业大学林学院,成都 611130;2.甘肃省生态环境工程评估中心,

兰州 730000;3.泸州市水务局,四川 泸州 646000)

摘要:以康定县折多山高寒山地灌丛草甸凋落物为研究对象,采用室外调查及室内测定结合的方法分析了凋落物蓄积量、持水及失水过程,以期探讨不同海拔和坡向凋落物水源涵养功能的差异。结果表明:(1)研究区凋落物的蓄积量在4.02~4.77 t/hm²波动,均表现出随着海拔的升高而逐渐降低,且半阴坡>半阳坡,海拔对凋落物蓄积量呈极显著影响($P<0.01$);(2)研究区凋落物最大持水量与蓄积量表现出一致的规律,有效拦蓄量最大为3 800 m 半阳坡(5.95 t/hm²),最小为3 800 m 半阴坡(2.53 t/hm²);(3)枯落物持水量与浸水时间关系式为: $W_t=a\ln(t)+b$;枯落物吸水速率与浸水时间关系式为: $V=kt^n$;失水量与失水时间呈显著对数关系($R^2>0.95$, $P<0.01$),失水速率与失水时间呈显著幂函数关系($R^2>0.99$, $P<0.01$)。可见,该地区灌丛草甸凋落物的水源涵养功能在不同海拔和坡向间有明显分异特征,控制放牧减轻草甸退化和增加该生态系统的物种多样性能有效提高该区凋落物水源涵养功能。

关键词:灌丛草甸;凋落物;持水性能;失水过程

中图分类号:S714.7

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)06-0219-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.031

Effects of Altitude and Slope Direction on Water Conservation Function of Litter in Alpine Shrub Meadow

LÜ Chen¹, GONG Wei¹, CHE Mingxuan¹, KANG Chengfang^{1,2},

XU Manjing¹, WU Qiang³, GONG Yuanbo¹

(1.College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130; 2.Gansu Appraisal Center for Eco-Environment & Engineering, Lanzhou 730000; 3.Luzhou Water Conservancy, Luzhou, Sichuan 646000)

Abstract: The alpine shrub meadow ecosystem in western Sichuan is of great significance to the water ecological security of the Yangtze River Basin, and its litter layer is one of the important components of the water conservation function in this ecosystem. The alpine shrub meadow litter in Zheduo mountain was chosen as study objective, the field investigation and laboratory analysis were used to study the litter accumulation, water holding and water loss process, in order to explore the difference of water conservation function of litter among different elevations and slope aspects. The results showed that: (1) The litter accumulation in the study area fluctuated between 4.02~4.77 t/hm², all of which showed a gradual decrease with the increase of altitude, and the rule of semi-shadow slope>semi-sun slope. The elevation had the extremely significant impact on litter accumulation ($P<0.01$); (2) The maximum water holding capacity and volume of litter in the study area showed the same law, the maximum effective storage capacity occurred in semi-sunny slope at 3 800 m (5.95 t/hm²), and the minimum occurred in semi-shady slope at 3 800 m (2.53 t/hm²); (3) The relationship between litter water holding capacity and immersion time was $W_t=a\ln(t)+b$; whereas the relationship between litter water absorption rate and immersion time was $V=kt^n$. Water loss amount and water loss time showed a significant logarithmic relationship ($R^2>0.95$, $P<0.01$), whereas water loss rate and water loss time showed a significant power function relationship ($R^2>0.99$, $P<0.01$). It could be seen that the water conservation function of shrub-meadow litter in this area had distinct characteristics under different altitudes and slope directions. Controlling grazing to reduce the meadow degradation and increasing the species diversity of this ecosystem could effectively improve the water conservation of litter in this area.

收稿日期:2020-05-10

资助项目:四川省科技厅重点项目“川西折多山高寒生态脆弱区植被恢复与重建技术研究”(2015FZ0022);四川省高校水土保持与荒漠化防治重点实验室建设项目

第一作者:吕宸(1994—),男,在读博士研究生,主要从事水土保持与植被恢复研究。E-mail:lvchen20167243@163.com

通信作者:宫渊波(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事退化生态系统恢复与重建研究。E-mail:gyb@sicau.edu.cn

Keywords: shrub meadow; litter; water holding capacity; dehydration process

水源涵养功能是森林生态系统服务功能的重要体现,凋落物层作为森林生态系统涵养水源功能在垂直结构上的第 2 层,对森林整体的水源涵养功能起着决定性作用^[1-3]。凋落物层除了自身对水分有较强的吸持能力外,在降雨过程中还避免了雨水与土壤的直接接触、有效地阻延地表径流的形成和土壤水分的逸散^[4-6]。同时,凋落物分解后的有机物质可以有效改良土壤结构,提高土壤的稳定性和抗蚀性,使森林涵养水源的生态功能得到充分的发挥^[7-9]。目前,对凋落物水源涵养效应的研究主要集中于植被类型、气候条件和分解程度等方面存在的差异,但对于山地条件下,特别是空间尺度上调落物水源涵养效应的研究却相对缺乏^[10-13]。同时,已有凋落物水源涵养功能研究多关注于凋落物持蓄水性能,往往忽视了凋落物的失水动态,因此对凋落物水源涵养的认识不够完整。

地处长江上游和青藏高原东缘的川西高寒山地,其区域内分布着大量江河湖泊,是我国长江流域重要的水源涵养区和江河发源地,对我国水资源及生态安全有着重要作用^[14-16]。而作为高寒山地涵养水源主要植被类型之一的灌丛草甸,在全球变暖的长期效应下,其分布规模和范围理应有极大的增加^[17],但就短期来说,受放牧等因素的影响导致了该地区灌丛草甸的明显退化,这也直接影响了该地区灌丛草甸的水源涵养功能及长江流域的水资源安全^[18-19]。因此,本文分析了川西高寒山地灌丛草甸凋落物持水及失水性能,对认识灌丛草甸凋落物水源涵养功能的空间变化规律有重要意义,也为研究该生态系统水源涵养功能提供了新思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省康定市折多山(101°44′—101°51′E,30°00′—30°08′N)。折多山是四川盆地与青藏高原的过渡地带,属于典型的高山峡谷区,多雪峰及高山湖泊,同时也是大渡河和雅砻江汇合的区域,最高海拔达 4 962 m。折多山以东属亚热带季风气候,以西是亚寒带季风气候与高原大陆性气候的交揉区,

年平均降水量 1 600 mm,主要集中在 5—9 月。主要土壤种类有山地暗棕壤、山地灰化土和高山草甸土。主要植被有杜鹃(*Rhododendron simsii*)、高山柏(*Sabina squamata*)、海桐(*Pittosporum tobira*)、小檗(*Berberis thunbergii*)、隐蕊杜鹃(*R. intricatum*)、草原杜鹃(*R. telmateium*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、紫菀(*Aster tataricus*)、金露梅(*P. fruticososa*)、卷耳(*Cerastium arvense*)、茅莓(*Rubus parvifolius*)高山蔷薇(*Rosa transmorrissonensis*)、绵毛水苏(*Stachys lanata*)、长梗蓼(*Polygonum calostachyum*)、云杉(*Picea asperata*)、冷杉(*Abies fabri*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)等。

1.2 样地设置与样品采集

于 2018 年 7 月在康定县折多山进行凋落物样品的采集。利用 GPS 获取海拔高度及地理坐标,从海拔 3 800 m 开始,海拔每上升 200 m 设置 1 个海拔梯度,共 3 个海拔梯度,分别为 3 800,4 000,4 200 m。每个海拔梯度分半阴坡(NE)和半阳坡(SW)2 个坡向。根据 3 个海拔梯度 2 个坡向共设置了 6 个大样地,考虑到采样所带来的误差,每个大样地选取了 3 个立地条件相似的 20 m×20 m 的标准样地作为样地重复,具体各样地基本情况见表 1。

1.3 指标测定与计算方法

1.3.1 凋落物储蓄量测定 凋落物样品的采集是在每个标准样地内选取 3 个具有代表性的小样方,按五点法分别确定小样方内凋落物厚度的测定位置,并用钢卷尺测量凋落物层厚度(凋落物没有明显分层,故未对其进行分层测定),测定结束后采集每个小样方内所有凋落物带回实验室测定分析。将采集的样品称重,称重后将其置于烘箱内烘干至凋落物质量不再改变,单位面积凋落物储蓄量的计算公式^[20]为:

$$M=M_0\times K\times 10^{-2}\tag{1}$$

式中: M 为样地凋落物蓄积量(t/hm^2); M_0 为小样方凋落物鲜重(g); $K=\frac{\text{凋落物干重}}{\text{凋落物鲜重}}$ 。

表 1 样地基本情况

采样点	海拔/m	坡向	坡度/(°)	温度/℃	土壤类型	主要植被
I 号	4 200	NE62°	31	0.94	高山草甸土	草原杜鹃、隐蕊杜鹃、委陵菜、绵毛水苏、紫菀
II 号	4 200	SW234°	14	2.40	高山草甸土	草原杜鹃、委陵菜、绵毛水苏
III 号	4 000	NE59°	25	1.16	高山草甸土	杜鹃、海桐、金露梅、小檗、卷耳、茅莓、长梗蓼
IV 号	4 000	SW239°	19	2.41	高山草甸土	杜鹃、委陵菜、金露梅、长梗蓼
V 号	3 800	NE64°	25	3.58	高山草甸土(漂灰化)	杜鹃、高山柏、云杉、冷杉、小檗、高山蔷薇
VI 号	3 800	SW241°	39	6.26	高山草甸土	高山柏、杜鹃、小檗、委陵菜、狼毒

1.3.2 凋落物持水性能及过程测定 将凋落物用透水网袋装好后放入水中浸泡,在 0.25,0.5,1,1.5,3,5,7,9,12,24 h 将网袋取出,分别测定其浸水后的重量,各时刻凋落物的持水量为凋落物浸水后的重量减去烘干重,持水量与浸泡时间之比为凋落物的吸水速率。具体计算公式^[20]为:

$$W=(0.85R_m-R_0)\times M \tag{2}$$

$$W_{\max}=(R_m-R_0)\times M \tag{3}$$

$$R_0=(K_{\text{鲜}}-K_{\text{干}})/K_{\text{干}}\times 100\% \tag{4}$$

$$R_m=(K_{\text{浸}24\text{ h}}-K_{\text{干}})/K_{\text{干}}\times 100\% \tag{5}$$

$$K_{\text{持}\max}=(K_{\text{浸}24\text{ h}}-K_{\text{干}})\times 10^{-2} \tag{6}$$

$$W_t=(K_t-K_{\text{干}})\times 10^{-2} \tag{7}$$

$$V=W_t/t \tag{8}$$

式中: W 为凋落物的有效拦蓄量(t/hm^2); R_m 为凋落物的最大持水率(%); R_0 为凋落物的平均自然含水率(%); M 为凋落物的蓄积量(t/hm^2); $K_{\text{鲜}}$ 为凋落物鲜重(g); $K_{\text{干}}$ 为凋落物干重(g); $K_{\text{浸}24\text{ h}}$ 为凋落物浸泡 24 h 后的重量(g); $K_{\text{持}\max}$ 为凋落物最大持水量(t/hm^2); $W_{\max}$ 为凋落物最大拦蓄量(t/hm^2); W_t 为浸泡后 t 时刻凋落物持水量(t/hm^2); K_t 为 t 时刻凋落物重量(g); V 为凋落物某时间段的吸水速率($\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$); t 为浸泡时间(h)。

1.3.3 凋落物失水量及过程测定 在凋落物浸水 24 h 后,取出悬挂以自然失水(室温 25℃),分别于 0.25,0.5,1,1.5,3,5,7,9,12,24 h 将网袋取出后称重,最后烘干称重(65℃),相关计算公式^[6]为:

$$W_{\text{st}}=(K_{\text{浸}24\text{ h}}-K_{\text{st}})\times 10^{-2} \tag{9}$$

$$V_{\text{st}}=W_{\text{st}}/t \tag{10}$$

式中: W_{st} 为凋落物 t 时刻时的累积失水量(t/hm^2); K_{st} 为凋落物失水 t 时刻后的重量(g); V_{st} 为凋落物某时间段的失水速率($\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$)。

1.4 数据分析

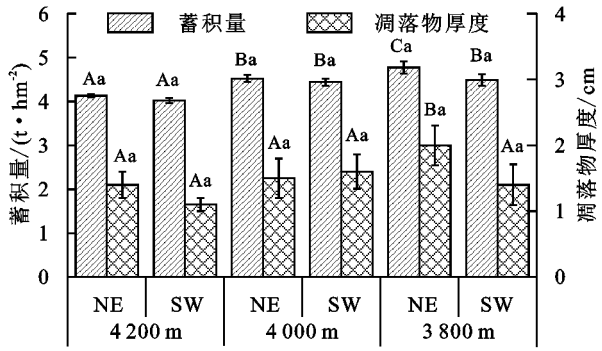
采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件对数据进行统计、曲线拟合和分析,采用 Origin 2018 软件绘图。采用单因素(One-way ANVOA)和最小显著差异法(LSD)比较不同海拔凋落物水文性质指标的差异,独立样本 T 检验(Independent-Samples T)比较不同坡向凋落物水文性质指标的差异。

2 结果与分析

2.1 不同海拔和坡向凋落物蓄积量

由图 1 可以看出,川西高寒山地灌丛草甸凋落物厚度在 1.1~2.0 cm 波动,凋落物蓄积量则在 3 800 m 半阴坡最大($4.77\text{ t}/\text{hm}^2$),4 200 m 半阳坡最小($4.02\text{ t}/\text{hm}^2$),凋落物的厚度与蓄积量呈显著正相关($r^2=0.775,P<0.05$)。在同一坡向,无论是半阴坡或是半阳坡,凋落物

的蓄积量皆表现出随着海拔的升高而逐渐降低的趋势,在海拔 3 800 m 时凋落物蓄积量达到最大。方差分析表明,半阴坡不同海拔凋落物的蓄积量有显著差异($P<0.05$),而在半阳坡,4 200 m 海拔凋落物蓄积量分别与 4 000,3 800 m 海拔凋落物蓄积量有显著差异($P<0.05$),但 4 000 m 海拔凋落物蓄积量与 3 800 m 海拔凋落物蓄积量差异不明显。而在同一海拔内,凋落物的蓄积量皆表现出半阴坡>半阳坡的规律。但无论是 4 200,4 000 m 或 3 800 m,半阴坡与半阳坡的凋落物蓄积量差异皆不显著($P>0.05$)。



注:不同大写字母表示同一坡向不同海拔差异性显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一海拔不同坡向差异性显著($P<0.05$);NE 表示半阴坡,SW 表示半阳坡。下同。

图 1 不同海拔和坡向凋落物蓄积量特征

2.2 不同海拔和坡向凋落物持水特征

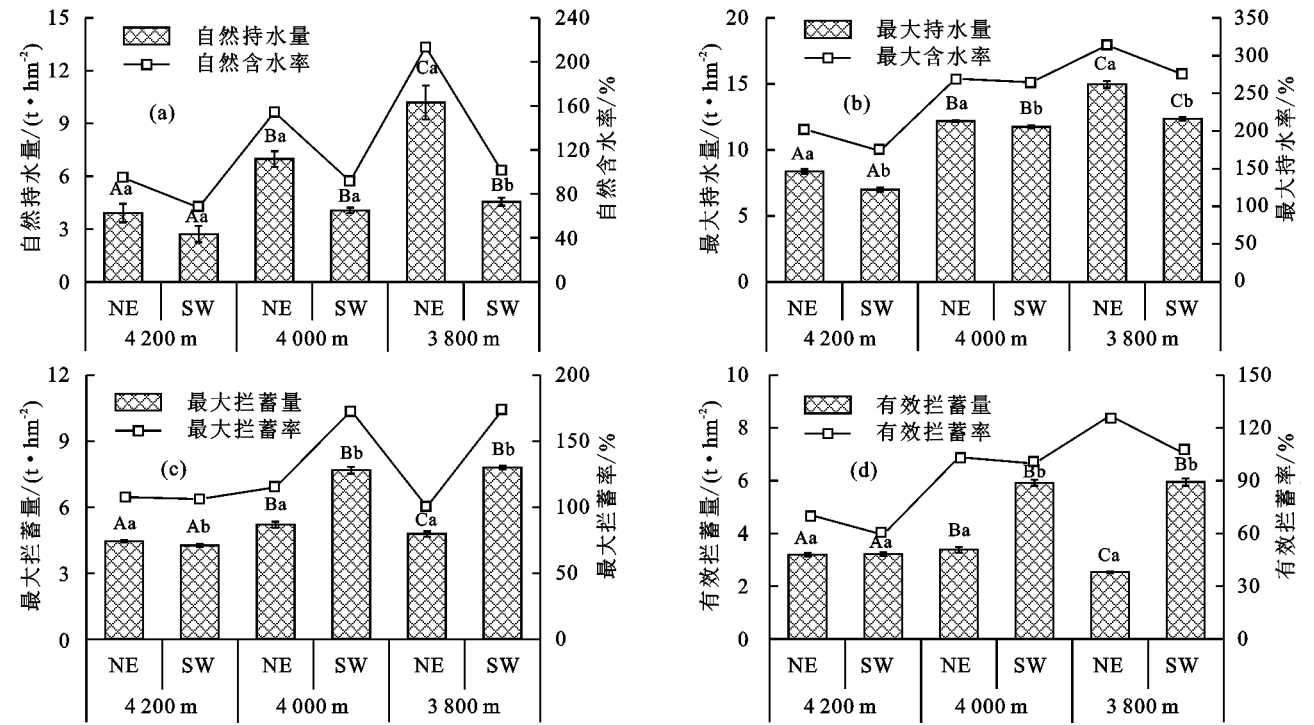
由图 2 可以看出,凋落物自然含水率在 67.53%~213.59%波动。经方差分析,半阴坡不同海拔凋落物的自然含水率有显著差异($P<0.05$);而在半阳坡,4 200 m 海拔凋落物自然含水率分别与 4 000,3 800 m 海拔凋落物自然含水率有显著差异($P<0.05$),这与凋落物蓄积量特征一致。在同一海拔内,凋落物的自然含水率皆表现出半阴坡>半阳坡的规律,方差分析结果表明,4 000,3 800 m 海拔的半阴坡和半阳坡凋落物自然含水率有显著差异($P<0.05$),4 200 m 海拔半阴坡和半阳坡凋落物自然含水率差异不明显。

凋落物的最大持水量最大为 3 800 m 半阴坡($14.97\text{ t}/\text{hm}^2$),最小为 4 200 m 半阳坡($6.98\text{ t}/\text{hm}^2$),其最大持水率与最大持水量顺序表现一致。凋落物的最大持水量和最大持水率在同一坡向内均表现出随着海拔的升高而降低的趋势,在同一海拔内,均呈现出半阴坡>半阳坡的规律。经方差分析,在同一坡向不同海拔及同一海拔不同坡向凋落物最大持水量均呈现出显著差异($P<0.05$)。

凋落物的最大拦蓄量在 $4.26\sim7.81\text{ t}/\text{hm}^2$ 变化。方差分析表明,在半阴坡,不同海拔凋落物的最大拦蓄量有显著差异($P<0.05$);而在半阳坡,4 200 m 凋落物的最大拦蓄量分别与 4 000,3 800 m 差异显著($P<0.05$)。在同一海拔内,4 200,4 000,3 800 m 的

凋落物的最大拦蓄量在半阴坡和半阳坡之间均有显

著差异($P<0.05$)。



注:不同大写字母表示同一坡向不同海拔差异性显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一海拔不同坡向差异性显著($P<0.05$)。

图 2 不同海拔和坡向凋落物持水特征

凋落物的有效拦蓄量最大为 3 800 m 半阳坡($5.95 t/hm^2$),最小为 3 800 m 半阴坡($2.53 t/hm^2$)。凋落物的有效拦蓄量总体呈现出随海拔的升高而降低,半阳坡大于半阴坡的规律。在同一坡向,凋落物有效拦蓄量的差异性与凋落物的最大拦蓄量差异性一致。但在同一海拔内,4 000,3 800 m 的凋落物的有效拦蓄量在半阴坡和半阳坡之间均有显著差异($P<0.05$),4 200 m 凋落物的有效拦蓄量无显著差异($P>0.05$)。

对凋落物持水特性的双因素方差分析结果表明,不同海拔的凋落物蓄积量、自然含水率、最大持水量、最大吸持水率、最大拦蓄量和有效拦蓄量均有极显著差异($P<0.01$)。不同坡向的凋落物自然含水率、最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量均有极显著差异($P<0.01$),最大吸持水率有显著差异($P<0.05$),凋落物蓄积量无显著差异($P>0.05$)。在海拔及坡向

的交互作用下,凋落物自然含水率、最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量均有极显著差异($P<0.01$),凋落物蓄积量和最大吸持水率无显著差异($P>0.05$)。

2.3 不同海拔和坡向凋落物持水过程

由图 3(a)可以看出,虽然凋落物持水量变化程度不同,但无论是半阴坡还是半阳坡,3 个海拔地表凋落物持水量都具有相似的动态变化特征。从凋落物浸水开始到浸水后 30 min,凋落物的持水量几乎呈直线式增长,此阶段凋落物持水量变化最大。浸水 3 h 后,凋落物持水量随着浸水时间的延长继续增加,但增长速度逐渐变缓,趋于平稳。浸水 12 h 后,凋落物持水量几乎没有变化,表明吸水趋于饱和。整个过程呈现出倒“J”形曲线。凋落物浸水 30 min 持水量占其浸水 24 h 持水量的百分比最大为 4 200 m 半阴坡(86.27%),最小为 4 000 m 半阴坡(70.28%)。

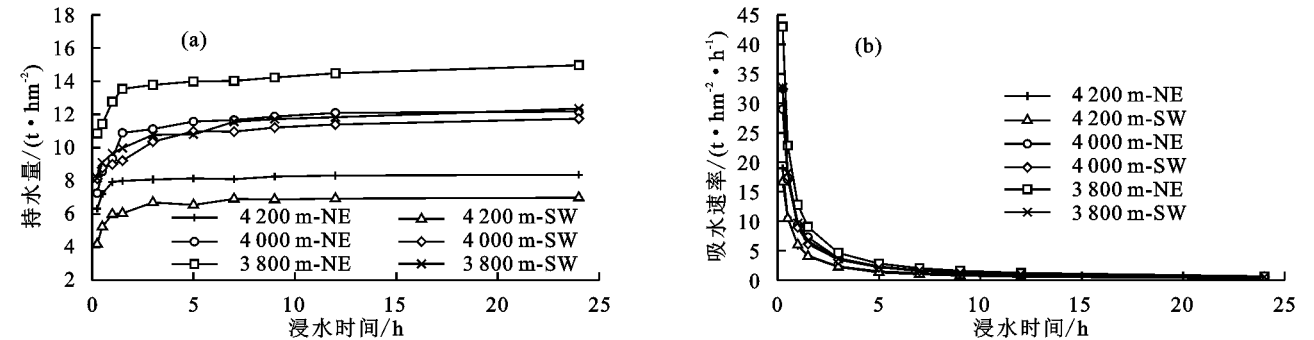


图 3 不同海拔和坡向凋落物持水过程

对高寒山地灌丛草甸凋落物 1~24 h 内持水量

与浸水时间的关系进行分析拟合得出,该时间段凋落

物持水量与浸水时间的关系式为: $W_t = a \ln(t) + b$ 。式中: W_t 为 t 时刻凋落物持水量(t/hm^2); t 为浸水时间(h); a 为方程系数; b 为方程常数项,拟合的回归方程见表 2。从持水量与浸水时间之间的关系可以得出,半阴坡、半阳坡不同海拔凋落物持水量与浸水时间之间曲线回归拟合结果较好,各函数的 R^2 值均大于 0.85,说明凋落物持水量与浸水时间存在着显著的相关性。

表 2 凋落物持水量、吸水速率与浸水时间的关系式

海拔/m	坡向	持水量		吸水速率	
		关系式	R^2	关系式	R^2
4200	NE	$W_T = 0.897 \ln(t) + 5.974$	0.970 **	$V = 5.883 t^{-0.864}$	0.999 **
	SW	$W_T = 0.579 \ln(t) + 5.603$	0.863 **	$V = 5.517 t^{-0.898}$	0.997 **
4000	NE	$W_T = 1.093 \ln(t) + 9.467$	0.906 **	$V = 9.321 t^{-0.889}$	0.998 **
	SW	$W_T = 0.860 \ln(t) + 9.240$	0.970 **	$V = 9.188 t^{-0.913}$	0.999 **
3800	NE	$W_T = 0.884 \ln(t) + 12.436$	0.920 **	$V = 12.360 t^{-0.931}$	0.999 **
	SW	$W_T = 0.908 \ln(t) + 9.606$	0.987 **	$V = 9.546 t^{-0.911}$	0.999 **

注: ** 表示 $P < 0.01$ 。

对该地区凋落物 1~24 h 内吸水速率与浸水时间的关系进行分析拟合得出,凋落物吸水速率与浸水时间呈幂函数关系,关系式为: $V = kt^n$ 。式中: V 为凋落物吸水速率($t/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$); t 为浸水时间(h); k 为方程系数; n 为指数,拟合的回归方程见表 2。所有凋落物的吸水速率与浸水时间之间曲线拟合程度极高($R^2 > 0.99$),凋落物持水量与浸水时间存在着极显著的相关性($P < 0.01$),持水过程受浸水时间影响较大。

2.4 不同海拔和坡向凋落物失水过程

凋落物的持水过程通常用来衡量凋落物在降水过程中的吸水能力,而失水过程则更多的体现降水结

束后凋落物的保水能力,特别是研究区所处的高海拔地区,凋落物失水过程对融雪后该地区水分的保持显得尤为重要。由图 4(a)可知,凋落物的失水量随着时间的增加而增多,且本试验中凋落物失水未趋于稳定。其中 4 000 m 半阳坡 24 h 内失水量最大,4 200 m 半阳坡失水量最小。在同一坡向,凋落物 24 h 内失水量随海拔的增高基本呈降低的趋势;而在同一海拔,24 h 内凋落物失水量均表现为半阳坡大于半阴坡。由图 4(b)可知,高寒山地灌丛草甸凋落物失水速率与失水时间的关系表现出一致性,在 0~5 h 内凋落物失水速率急速下降,5 h 后趋于稳定。

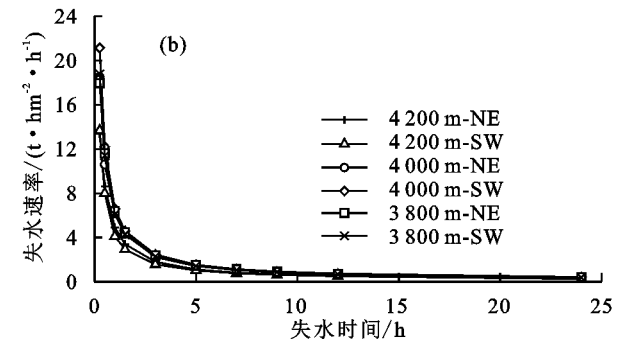
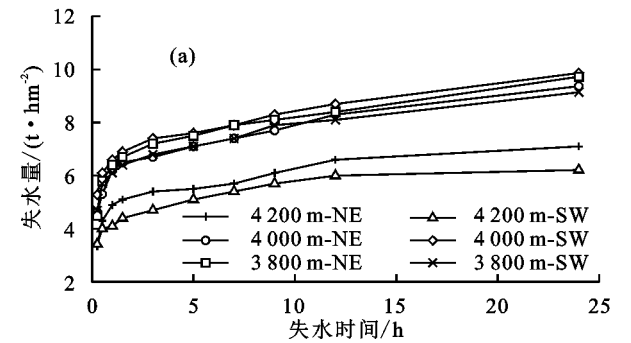


图 4 不同海拔和坡向凋落物失水过程

对高寒山地灌丛草甸凋落物 1~24 h 内失水量、失水速率与失水时间的关系进行分析拟合,得出该时间段凋落物失水量与失水时间呈显著对数关系($P < 0.01$),各函数的 R^2 值均大于 0.95;而失水速率与失水时间呈显著幂函数关系($P < 0.01$),各函数的 R^2 值均大于 0.99,具体函数关系式见表 3。

由图 5 可知,各灌丛草甸凋落物失水初期(0.25 h)时失水量占总持水量比值均小于失水末期(24 h)。在同一坡向,不论是失水初期还是失水末期,凋落物

失水量占总持水量的比值均表现为随着海拔的增加而增加;而在同一海拔,凋落物失水量占总持水量的比值则均表现为半阳坡大于半阴坡。

3 讨论

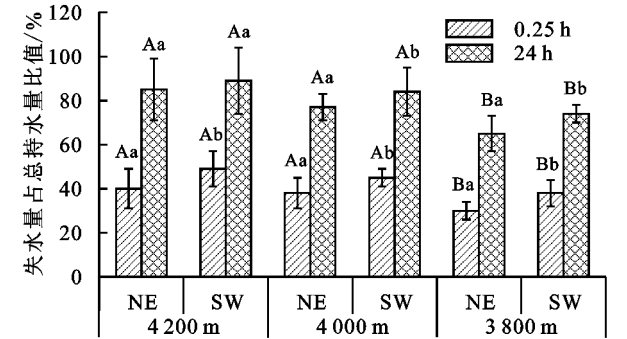
凋落物的蓄积量受植被类型种类、气候条件、地形因子和分解速率等多种因素影响,凋落物蓄积量的大小直接影响着凋落物对水分的截持能力,是衡量凋落物涵养水源能力的重要指标。温度和湿度是影响凋落物储量的主要气候因子^[21-23],除此之外,凋落物

自身的性质也影响着凋落物的分解,而地形对凋落物储量的作用,通常是通过改变其水热状况、分解者活性以及植被状况等间接影响储量^[24]。在本研究中,凋落物的蓄积量有明显的变化规律,即随着海拔的增高蓄积量降低,半阴坡蓄积量高于半阳坡。同一坡向不同海拔凋落物蓄积量有明显差异,原因可能是由于海拔不同,水热情况的变化导致了植物丰富度的变化,海拔越高,植物的丰富度越低,其凋落物的输入也

表 3 凋落物失水量、失水速率与失水时间的关系式

海拔/m	坡向	失水量		失水速率	
		关系式	R^2	关系式	R^2
4200	NE	$W_{st}=0.724\ln(t)+4.620$	0.954 **	$V_{st}=4.538 t^{-0.857}$	0.998 **
	SW	$W_{st}=0.624\ln(t)+4.226$	0.975 **	$V_{st}=4.180 t^{-0.868}$	0.999 **
4000	NE	$W_{st}=0.926\ln(t)+5.917$	0.959 **	$V_{st}=5.841 t^{-0.861}$	0.999 **
	SW	$W_{st}=0.885\ln(t)+6.506$	0.962 **	$V_{st}=6.448 t^{-0.878}$	0.999 **
3800	NE	$W_{st}=0.981\ln(t)+6.159$	0.966 **	$V_{st}=6.055 t^{-0.856}$	0.999 **
	SW	$W_{st}=0.862\ln(t)+5.999$	0.969 **	$V_{st}=5.932 t^{-0.871}$	0.999 **

注: ** 表示 $P<0.01$ 。



注: 不同大写字母表示同一坡向不同海拔差异性显著 ($P<0.05$); 不同小写字母表示同一海拔不同坡向差异性显著 ($P<0.05$)。

图 5 凋落物失水量与总持水量比值

凋落物的持水能力是反映其涵养水源能力的重要指标之一,是生态系统中水循环的重要环节。凋落物的最大持水量和最大持水率因为受到试验条件及前期水分状况等多重因素的干扰,其值通常比真实值高,不能准确地反映凋落物的持水性能。因此,通常用有效拦蓄量来衡量凋落物对降水的真正拦蓄能力^[28]。本研究中,凋落物的有效拦蓄量总体呈现出随海拔的升高而降低、半阳坡大于半阴坡的规律,自然含水量表现为随着海拔的升高而降低、半阴坡大于半阳坡的规律,这与潘刚等^[29]的研究结果一致。自然含水量随海拔变化的原因可能在相对较低的海拔地区有充足的水汽,而在 4 200 m 处由于抬升作用空气湿度变低,并且 4 200 m 处是折多山垭口位置,风速远高于 4 000, 3 800 m,凋落物的中的水分逸散速度较快。在半阳坡,由于太阳的辐射比半阴坡要多,因此温度也较高,水分蒸发较快。有效拦蓄量的变化除气候因素外,也与凋落物自身组成有极大的关系,研究^[30]发现,海拔越低植被或凋落物的组成越多样,在同一海拔,半阴

越低,这与卢振启等^[25]的研究结果相似。同一海拔不同坡向凋落物蓄积量均表现为半阴坡高于半阳坡,原因可能是由于半阴坡相对于半阳坡光照不充足,温度低,凋落物分解者的活动及新陈代谢受到很大的抑制,使凋落物很难分解,加上半阴坡的植物种类和密度都高于半阳坡^[26],导致同一海拔内半阴坡凋落物蓄积量高于半阳坡凋落物蓄积量,这也与吴艳芹等^[27]对草地凋落物分解的研究一致。

坡的多样性也高于半阳坡,而凋落物组成越多样,通常也会有更好的水分拦蓄效果。

凋落物层不同时间段持水量以及吸水速率的变化反映了凋落物对雨水吸持的动态过程,而失水量及失水速率体现了凋落物的保水作用,两者几乎涵盖了凋落物涵养水源的整个过程。本研究中,凋落物的吸水量与时间呈指数关系,吸水速率与时间呈幂函数关系,金雅琴等^[31]也得出相同的函数关系式。在 3 800 m 半阴坡凋落物的吸水速率最大,吸水速率大说明该地区凋落物对外源水分具有较强的调节能力,能够在短时间内吸收降水,并有效地减少地表径流。凋落物的失水量与失水时间呈显著对数关系,失水速率与失水时间呈显著幂函数关系,这与多数研究^[6,32-33]结果一致。由于不同凋落物前期持水量或总持水量有所差异,在凋落物的失水过程中,仅仅用凋落物的失水量和失水速率来衡量凋落物的失水特征在一定程度上是不具备可比性的,因此本研究引入失水量占总持水量这一概念,以期将凋落物的失水特征放在同一水平上进行比较。凋落物失水量占总持水量的比值表现出随着海拔的增加而增加、半阳坡大于半阴坡的规律,比值越高,说明凋落物在相同条件下越容易失水。由此可见,本研究中 3 800 m 半阴坡凋落物不仅能够降水发生时快速吸持水分,并且在降水结束或融雪阶段也能够有效防止水分的逸散和流失,具有良好的水分调蓄和保水能力。该地区灌丛草甸凋落物的水源涵养功能受气候及植被组成类型影响较大,针对目前灌丛草甸的退化以及今后该地区水资源生态安全的需求,建议一方面适度放牧,减少对灌丛草甸生态系统的破坏;另一方面可进行适当的

人为干预,增加植被的种类及数量,从而提高整个灌丛草甸生态系统的水源涵养及水土保持功能。

4 结 论

(1)研究区凋落物的蓄积量表现出半阴坡大于半阳坡的规律,而无论是半阴坡或是半阳坡,凋落物的蓄积量皆表现出随着海拔的升高而逐渐降低的趋势,最大为 3 800 m 半阴坡(4.77 t/hm²),最小为 4 200 m 半阳坡(4.02 t/hm²)。

(2)研究区凋落物的最大持水量在 6.98~14.97 t/hm²波动,且均表现出随着海拔的升高而降低、半阴坡大于半阳坡的规律。而有效拦蓄量则基本呈现出随海拔的升高而降低、半阳坡大于半阴坡的规律,最大为 3 800 m 半阳坡(5.95 t/hm²),最小为 3 800 m 半阴坡(2.53 t/hm²)。

(3)枯落物持水量与浸水时间关系式为: $W_t = a\ln(t) + b$;枯落物吸水速率与浸水时间关系式为: $V = kt^n$;且曲线拟合程度均比较高;失水量与失水时间呈显著对数关系,失水速率与失水时间呈显著幂函数关系。

参考文献:

[1] Gong S H, Xiao Y, Xiao Y, et al. Driving forces and their effects on water conservation services in forest ecosystems in China[J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27 (2): 216-228.

[2] Jordi G P, Pere C, Joan R. Litter decomposition and faunal activity in mediterranean forest soils: Effects of N content and the moss layer[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(6): 989-997.

[3] 王玲,赵广亮,周红娟,等.八达岭林场不同密度油松人工林枯落物水文效应[J].生态环境学报, 2019, 28(9): 1767-1775.

[4] Park A, Friesen P, Serrud A A S. Comparative water fluxes through leaf litter of tropical plantation trees and the invasive grass saccharum spontaneum in the republic of panama[J]. Journal of Hydrology, 2010, 383(3/4): 167-178.

[5] Acharya B S, Stebler E, Zou C B. Monitoring litter interception of rainfall using leaf wetness sensor under controlled and field conditions[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(1): 240-249.

[6] 刘一霖,温娅檬,李巧玉,等.川西高山峡谷区 6 种森林枯落物的持水与失水特性[J].水土保持学报, 2019, 33 (5): 151-156.

[7] Lyuyi L, Ziqi B, Shengyan D. Consequences of spatial heterogeneity of forest landscape on ecosystem water conservation service in the Yi River watershed in central China[J]. Sustainability, 2020, 12(3): 1-15.

[8] 敖特根其木格,秦富仓,周佳宁,等.内蒙古自治区多伦县不同林地枯落物持水性能研究[J].水土保持通报,

2017, 37(4): 114-118.

[9] 贺淑霞,李叙勇,莫菲,等.中国东部森林样带典型森林水源涵养功能[J].生态学报, 2011, 31(12): 3285-3295.

[10] 王正安,邸利,王彦辉,等.白桦纯林和华北落叶松纯林枯落物层的水文效应:以六盘山叠叠沟小流域为例[J].甘肃农业大学学报, 2019, 54(3): 93-98.

[11] 张建利,吴华,喻理飞,等.草海湿地流域优势树种凋落物叶分解与水文特征研究[J].水土保持学报, 2014, 28 (3): 98-103.

[12] 高迪,郭建斌,王彦辉,等.宁夏六盘山不同林龄华北落叶松人工林枯落物水文效应[J].林业科学研究, 2019, 32(4): 26-32.

[13] 黄乾,杨海龙,朱柱,等.青海云杉造林密度与水源涵养功能的响应关系[J].水土保持学报, 2019, 33(4): 279-286.

[14] 于方明,刘华,刘可慧,等.川西亚高山暗针叶林恢复初期土壤酶活性研究[J].生态环境学报, 2012, 21(1): 64-68.

[15] 王克勤.水文生态退化与西南水战略[J].南昌工程学院学报, 2014, 33(4): 1-4.

[16] 吕宸,宫渊波,车明轩,等.川西高寒山地灌丛草甸土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报, 2020, 34(2): 9-17.

[17] Hagedorn F, Gavazov K, Alexander J M. Above- and belowground linkages shape responses of mountain vegetation to climate change [J]. Science, 2019, 365 (6458): 1119-1123.

[18] 刘颖,宫渊波,李瑶,等.川西高寒灌丛草地不同海拔梯度土壤化学计量特征[J].四川农业大学学报, 2018, 36 (2): 167-174.

[19] 徐梦佳,刘冬,葛峰,等.长江经济带典型生态脆弱区生态修复和保护现状及对策研究[J].环境保护, 2017, 45 (16): 50-53.

[20] 杨霞,陈丽华,康影丽,等.辽东低山区 5 种典型水源涵养林枯落物持水特性[J].生态学杂志, 2019, 38(9): 2662-2670.

[21] Yahdjian L, Sala O E, Austin A T. Differential controls of water input on litter decomposition and nitrogen dynamics in the patagonian steppe[J]. Ecosystems, 2006, 9(1): 128-141.

[22] Austin A T, Lucia V. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation [J]. Nature, 2006, 442(7102): 555-558.

[23] 吴鹏,王襄平,张新平,等.东北地区森林凋落叶分解速率与气候、林型、林分光照的关系[J].生态学报, 2016, 36(8): 2223-2232.

[24] Liu G, Sun J, Tian K, et al. Long-term responses of leaf litter decomposition to temperature, litter quality and litter mixing in plateau wetlands[J]. Freshwater Biology, 2017, 62(1): 178-190.

[25] 卢振启,黄秋娴,杨新兵.河北雾灵山不同海拔油松人工林枯落物及土壤水文效应研究[J].水土保持学报, 2014, 28(1): 112-116.

[13] 王颖辉,汤鹏程,李曙光,等.内蒙古东部干旱年份玉米需水规律及灌溉制度优化[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):108-114.

[14] 于芷婧,尚松浩.华北轮作农田灌溉制度多目标优化模型及应用[J].水利学报,2016,47(9):1188-1196.

[15] 张志宇,郅志红,吴鑫森.冬小麦—夏玉米轮作体系灌溉制度多目标优化模型[J].农业工程学报,2013,29(16):102-111.

[16] 周始威,胡笑涛,王文娥,等.基于 RZWQM 模型的石羊河流域春小麦灌溉制度优化[J].农业工程学报,2016,32(6):121-129.

[17] Bouman B A M, Kropff M J, Tuong T P, et al. ORYZA 2000: Modeling lowland rice[M].Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute,2003.

[18] 薛昌颖,杨晓光,邓伟,等.应用 ORYZA2000 模型制定北京地区旱稻优化灌溉制度[J].农业工程学报,2008,24(4):76-82.

[19] 张水清,林杉,郭斗斗,等.长期施肥下潮土全氮、碱解氮含量与氮素投入水平关系[J].中国土壤与肥料,2017(6):23-29.

[20] 马忠明,王平,陈娟,等.适量有机肥与氮肥配施方可提高河西绿洲土壤肥力及作物生产效益[J].植物营养与肥料学报 2016,22(5):1298-1309.

[21] 王艳杰,付桦.雾灵山地区土壤有机质全氮及碱解氮的关系[J].农业环境科学学报,2005,24(增刊 1):85-90.

[22] 巨晓棠.氮肥有效率的概念及意义:兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J].土壤学报,2014,51(5):921-933.

[23] 科斯特·梅纳德.应用 Logistic 回归分析[M].李俊秀译.上海:格致出版社,2012.

[24] 李锋,李银坤.基于 GIS 与地统计学宁夏枸杞主产区不同树龄土壤肥力特征研究[J].北方园艺,2017(24):134-143.

(上接第 225 页)

[26] 华青措.不同坡向高山嵩草草甸地上生物多样性及土壤因子变化[J].青海草业,2016,25(1):5-8.

[27] 吴艳芹,程积民,白于,等.坡向对云雾山典型草原枯落物分解特性的影响[J].草地学报,2013,21(3):460-466.

[28] 徐娟,余新晓,席彩云.北京十三陵不同林分枯落物层和土壤层水文效应研究[J].水土保持学报,2009,23(3):189-193.

[29] 潘刚,任毅华,边巴多吉,等.西藏色季拉山急尖长苞冷杉林枯枝落叶及苔藓层的生物量与持水性能[J].水土保持研究,2008,15(5):81-83,87.

[30] Sato Y, Kumagai T, Kume A, et al. Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers: The effects of rainfall conditions and leaf shapes [J]. Hydrological Processes,2004,18(16):3007-3018.

[31] 金雅琴,李冬林,孙丽娟,等.南京近郊人工林地表枯落物的累积量及持水性[J].中国水土保持科学,2018,16(5):95-104.

[32] 喻阳华,李光容,皮发剑,等.赤水河上游主要森林类型水源涵养功能评价[J].水土保持学报,2015,29(2):150-156.

[33] 许文盛,王一峰,童晓霞,等.紫鹊界梯田区植被凋落物水资源调配特性[J].水土保持学报,2013,27(4):130-135.

(上接第 234 页)

[22] Wu Q, Wang Y Z, Chen T T, et al. Soil nitrogen regulation using clinoptilolite for grain filling and grain quality improvements in rice[J].Soil and Tillage Research, 2020,199:104547.

[23] 吴奇.斜发沸石对水稻节水增产及控氮机理研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.

[24] Sah R N, Mikkelsen D S. Availability and utilization of fertilizer nitrogen by rice under alternate flooding[J]. Plant and Soil,1983,75(2):221-226.

[25] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等.提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J].中国农业科学,2002(9):1095-1103.

[26] 张聪智.生物炭对设施菜地土壤氮素缓控效应研究[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2015.

[27] 张星,张晴雯,刘杏认,等.施用生物炭对农田土壤氮素转化关键过程的影响[J].中国农业气象,2015,36(6):709-716.

[28] Wang M M, Zhou Q X. Environmental effects and their mechanisms of biochar applied to soils[J].Environmental Chemistry,2013,32(5):768-780.

[29] Deluca T H, Mackenzie M D, Gundale M J, et al. Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in ponderosa pine forests[J].Soil Science Society of America Journal,2006,70(2):448-453.

[30] 王思源,申健,李盟军,等.不同改性生物炭功能结构特征及其对铵氮吸附的影响[J].生态环境学报,2019,28(5):1037-1045.

[31] Chu J, Xue J H, Jin M J, et al. Review of researches on effects of biochar in reducing nitrogen and phosphorus losses with agricultural non point source pollution[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014,30(4):409-415.

[32] 高海英.一种生物炭基氮肥的特征及其对土壤作物的效应研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.

[33] Khan M A, Kim K W, Mingzhi W, et al. Nutrient-impregnated charcoal: An environmentally friendly slow-release fertilizer [J]. The Environmentalist, 2008, 28(3):231-235.