

宁南黄土丘陵区3种典型林分的结构与水文影响比较

韩新生^{1,2}, 许浩¹, 蔡进军¹, 王月玲¹, 董立国¹

(1. 宁夏农林科学院荒漠化治理研究所, 宁夏防沙治沙与水土保持重点实验室, 银川 750002;
2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

摘要: 为分析宁南黄土丘陵区林分结构的水文功能影响关系及差异, 以彭阳县3种典型林分(山杏纯林、山杏柠条混交林、山杏沙棘混交林)为对象, 在2017年生长季观测了林下草本生物量和生物多样性、冠层降雨再分配、林下蒸散、土壤湿度的变化特征。结果表明: (1) 林分地表覆盖度大小顺序为山杏沙棘混交林(0.81) > 山杏柠条混交林(0.71) > 山杏纯林(0.67); 草本植物地上生物量为山杏沙棘混交林(0.86) > 山杏纯林(0.62) > 山杏柠条混交林(0.41); 草本植物生物多样性为山杏柠条混交林 > 山杏沙棘混交林 > 山杏纯林。(2) 3种林分类型的冠层都相对稀疏, 降雨穿透率均 > 90%, 穿透雨量与林外降雨呈线性正相关; 干流量和林冠截留量与林外降雨呈对数关系。(3) 林下蒸散的季节变化呈“单峰型”, 研究期间林下蒸散表现为山杏沙棘混交林(245.0 mm) > 山杏纯林(227.7 mm) > 山杏柠条混交林(220.9 mm), 其中山杏柠条混交林的月际间差异最小。(4) 生长季内土壤湿度在中上层(0—80 cm)表现为逐渐降低趋势, 在深层则相反; 深层土壤水分的林分差异为山杏纯林 > 山杏沙棘混交林 > 山杏柠条混交林。在干旱缺水、侵蚀严重的黄土区, 要恢复以水土保持为主要功能的稳定植被时, 既要考虑植被配置模式对地表覆盖和草本生物量及物种多样性的影响, 也要考虑对土壤湿度的影响, 因此建议在植被恢复中尽量选择山杏沙棘混交林和山杏纯林。

关键词: 林分结构; 降雨再分配; 林下蒸散; 土壤湿度; 黄土丘陵区

中图分类号: S715 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2018)06-0192-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.06.028

Comparison of Structure and Hydrological Influence of Three Typical Stands in Loess Hilly Regions of Southern Ningxia

HAN Xinsheng^{1,2}, XU Hao¹, CAI Jinjun¹, WANG Yueling¹, DONG Liguol¹

(1. Ningxia Key Laboratory of Desertification Control and Soil and Water Conservation, Institute of Desertification Control, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002; 2. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of

Forestry, Key Laboratory of Forestry Ecology and Environment, State Forestry Administration, Beijing 100091)

Abstract: In order to analyze the relationship and difference of hydrological function of the stands structure in the loess hilly regions of southern Ningxia, the characteristics of understory herb biomass and biodiversity, canopy rainfall redistribution, forest understory evapotranspiration and soil moisture were studied in three typical forest stands (*Armeniaca sibirica* pure forest, *Armenia sibirica*-*Caragana korshinskii* mixed forest, *Armeniaca sibirica*-*Hippophae rhamnoides* mixed mixed forest) located in Pengyang County during the growing season in 2017. The results were as follows: (1) The order of stands surface coverage was *A. sibirica*-*H. rhamnoides* (0.81) > *A. sibirica*-*C. korshinskii* (0.71) > *A. sibirica* (0.67), the aboveground biomass of herbaceous plants followed the order of *A. sibirica*-*H. rhamnoides* (0.86 t/hm²) > *A. sibirica* (0.62 t/hm²) > *A. sibirica*-*C. korshinskii* (0.41 t/hm²), and the herbaceous plant biodiversity was followed the order of *A. sibirica*-*C. korshinskii* > *A. sibirica*-*H. rhamnoides* > *A. sibirica*. (2) The canopies of the three stands were relatively sparse, and the rainfall penetration rate were all greater than 90%, and the penetration rainfall was

收稿日期: 2018-06-07

资助项目: 宁夏回族自治区全产业链创新示范项目(QCYL-2018-12); 宁夏回族自治区自然科学基金项目(NZ17132); 国家重点研发计划项目(2017YFC0504600, 2016YFC0501702); 国家自然科学基金项目(31660375); 国家林业和草原局宁夏六盘山森林生态定位站和宁夏回族自治区生态修复与多功能林业综合研究中心项目

第一作者: 韩新生(1988—), 男, 在读博士研究生, 主要从事森林生态水文研究。E-mail: hanxs@caf.ac.cn

linearly correlated with the rainfall outside the forest, the stemflow and the canopy interception were logarithmic related to the rainfall outside the forest. (3) The seasonal variation of forest understory evapotranspiration was "single-peak type", and the size of forest understory evapotranspiration during the research period was followed the order of *A. sibirica*-*H. rhamnoides* (245.0 mm) > *A. sibirica* (227.7 mm) > *A. sibirica*-*C. korshinskii* (220.9 mm), among them, the intermonthly variation of *A. sibirica*-*C. korshinskii* was the minimum. (4) The soil moisture in the middle and upper layers (0—80 cm) basically showed decreasing trend during the growing season, while the deep soil moisture showed the opposite trend, and the difference in the deep soil moisture was showed as *A. sibirica* > *A. sibirica*-*H. rhamnoides* > *A. sibirica*-*C. korshinskii*. In the severe erosion and drought-stricken loess region, when restoring stable vegetation with water and soil conservation as the main function, it was necessary to consider the effects of vegetation allocation patterns on surface cover and herb biomass and species diversity, as well as to consider the effect on soil moisture. Therefore, it is recommended to choose *A. sibirica*-*H. rhamnoides* mixed forest and *A. sibirica* pure forest in the vegetation restoration.

Keywords: stand structure; rainfall redistribution; forest understory evapotranspiration; soil moisture; loess hilly region

水文功能是森林生态系统的重要功能之一,是植被、土壤、气候等综合作用的结果,主要体现在森林各作用层(林冠层、林下植被层、枯落物层和土壤层)对水分的调节与再分配过程上^[1],主要受植被种类^[2-3]及森林结构^[4-7]、枯枝落叶层厚度^[7]及现存量^[8-9]、土壤层厚度及孔隙度等因素影响。近些年来,国内外学者对林分结构与水文功能的关系进行了大量研究,表明树种组成能影响水文功能^[10-12];林分的树高、胸径、冠幅和郁闭度等与降雨再分配极显著相关^[13]。此外,海拔^[14]、林分密度^[15]等也对水文功能有很大作用。以往研究多集中于森林水文功能评价^[16-17]或林分结构差异规律^[18-19],对不同类型林分的结构与水文功能的关系分析相对较少,尤其是在水分短缺、侵蚀严重的黄土丘陵区急需进行相关研究分析,以期为该区域植被建设与结构调整提供科技支撑。

在宁南黄土丘陵区,21 世纪初期进行了大面积的坡改梯、退耕还林还草和人工造林等工程,在控制水土流失和改善生态环境方面成效显著。但由于该区降水较少和潜在蒸散较高,植被死亡及退化严重,植被的结构较差,稳定性较弱,导致植被水文功能下降或不能充分发挥等问题。以前在该区进行了大量的土壤理化性质研究^[20-21],但还缺乏林分结构优劣与水文功能强弱的同步研究和定量对比。因此,本文在宁南黄土丘陵区选择了当地 3 种典型林分,探讨其林冠层结构对草本层特征的影响以及对主要水文功能的影响差异,以为该区森林植被的结构改善与功能提升提供理论基础和技术支持。

1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区彭阳县(34°14′—37°04′N,105°09′—106°58′E),属黄土高原腹地,地貌

类型为梁峁丘陵地,区内梁峁相间,沟壑纵横,地形破碎。海拔 1 544~1 826 m,具有典型的温带大陆性气候,夏季潮湿炎热,冬季干燥寒冷;年均降水量 406 mm,主要集中于 6—9 月份;年均蒸发量 1 360.6 mm;年均气温 7.4 °C,≥10 °C 年积温 2 500~2 800 °C,无霜期 140~160 d。土壤以黑垆土和黄绵土为主,侵蚀较为严重。当地植被属典型干草原,主要由百里香(*Thymus mongolicus*)、本氏针茅(*Stipa capillata*)、芨芨(*Incarvillea sinensis*)、西山委陵菜(*Potentilla sischuanensis*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、糙隐子(*Cleistogenes squarrosa*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)等群落构成。该区进行了大面积退耕还林还草,人工林主要为山杏(*Armeniaca sibirica*)、山桃(*Amygdalus davidiana*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等纯林或混交林。

2 研究方法

2.1 植被选择与样地设置

为研究不同类型林分的结构与水文功能,在中庄选择了山杏沙棘混交林、山杏柠条混交林,在牛湾选择了山杏纯林,这 3 种典型林分均是 2002 年前后退耕还林工程栽植的。在代表性地点设置了面积为 20 m×20 m 的标准样地,2017 年调查了样地内林木的树高、胸径、密度、冠幅等基本指标,具体信息与林木基本特征见表 1。

2.2 植被结构指标调查

2017 年 7—8 月采用样方法调查了 3 种林分的植被群落特征。在每个样地周围,选择能代表样地植物群落特征的地点,设置 10 个 1 m×1 m 的样方,调查草本植物种类、密度、高度、频度、盖度及地上生物量等。草群

盖度采用针刺法测定;频度采用样圈法测定;密度通过记录单位面积的分蘖、分枝数测定;高度则通过随机量取 5 株的平均值测定;地上生物量采用收获法测定,即紧贴地表用剪刀剪断并称取鲜重,带回实验室烘干后称其干重。物种多样性的计算采用马克平等^[22]的丰富度指数、多样性指数及均匀度指数公式(1)~(6):

$$\text{重要值}(IV) = (\text{相对盖度} + \text{相对高度} + \text{相对密度} + \text{相对频度})/4 \quad (1)$$

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数}: H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$\text{Simpson 多样性指数}: D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^S n_i(n_i-1)}{N(N-1)} \quad (3)$$

$$\text{Margalef 丰富度指数}: R_1 = (S-1)/\ln N \quad (4)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数}: E_1 = -\frac{\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i}{\ln S} \quad (5)$$

$$\text{Alatalo 均匀度指数}: E_3 = \frac{(\sum_{i=1}^S P_i^2)^{-1} - 1}{\exp(-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i) - 1} \quad (6)$$

式中: S 为样地植物种数; $i=1, 2, 3, \dots$; n_i 为每一种的重要值; N 为全部种的重要值之和; P_i 为第 i 种的相对重要值。

表 1 研究林分样地的基本特征

林分类型	经纬度	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	坡位	密度/ (株·hm ⁻²)	株高/ m	地径/ cm	冠幅 直径/m	郁闭度 (盖度)	林龄/ a	林分地表 覆盖度
山杏	106°45'29.66"E 35°57'1.84"N	1723	22	西	坡中	675	3.77	12.45	3.26	0.28 (0.62)	15	0.67
山杏×柠条	106°43'29.05"E 35°56'28.95"N	1685	22	东北	坡上	575 <1125>	4.19 <1.47>	12.62	3.56 <1.50>	0.25 (0.66)	15	0.71
山杏×沙棘	106°43'25.68"E 35°56'42.53"N	1627	20	西	坡上	375 <2259>	3.64 <1.04>	9.93 <1.87>	2.93 <0.64>	0.17 (0.69)	15	0.81

注: <>内表示柠条和沙棘的情况; ()内表示草本植物的基本情况。

物种多样性指数是群落物种丰富度和均匀度的综合反映,是评价系统结构、功能复杂性及其生态异质性的主要参数,植物种的丰富度是决定物种多样性的主要因子,均匀度表示物种在群落内分布的均匀程度,即群落内物种个体数越接近,均匀度越大,反之则越小。

2.3 降雨再分配测定

在 2017 年 4 月 17 日至 10 月 26 日的整个生长季,测定空旷地雨量及其林内再分配。因为 2 种混交林中沙棘和柠条的树高、地径和冠幅都相对较小,在降雨再分配中的作用较弱,本文中未考虑。林外降雨 (P , mm) 是样地附近空旷处的标准雨量筒(直径 20 cm)测定值;穿透雨量 (TF , mm) 是在样地内林木生长和冠层分布相对均衡处布设的 6~9 个标准雨量筒测定雨量的平均值;干流量 (SF , mm) 是在每个样地内不同径级林木选择标准株 3~5 株,将直径 3~4 cm 的塑料软管剪开后反折呈螺旋状在树干上缠绕 2~3 圈,用钉子固定并用玻璃胶密封防止侧漏,在塑料管下端连接 1 个 35 L 的塑料筒收集干流,然后按公式(7)计算林分干流量:

$$SF = \sum_{i=1}^n \frac{SF_i \cdot M_i}{10^4 A} \quad (7)$$

式中: SF 为样地的干流深(mm); n 为树干径级数; SF_i 为第 i 径级的单株干流量(mL); M_i 为第 i 径级

的林木株数; A 为样地面积(m²)。

冠层截留 (I , mm) 基于水量平衡计算:

$$I = P - TF - SF \quad (8)$$

2.4 林下蒸散量测定

在 3 种林分样地内,选择能代表植被生长特征的地点,安装 6 个微型蒸渗仪(内径 20 cm,高 35 cm),在 2017 年整个生长季,每月称重,利用前后两次称重值与期间降雨量和微型蒸散仪渗漏量的差值计算得到时段林下蒸散量 ET (mm):

$$ET = 10(W_1 - W_2)/S + P - L \quad (9)$$

式中: W_1 和 W_2 为蒸渗仪前、后称重(g); S 为蒸渗仪断面积(3.14×10 cm×10 cm=314 cm²); P 和 L 为观测时段内的降雨量(mm)和蒸渗仪渗漏水量(mm)。

2.5 土壤湿度测定

在 2017 年 3 月到 7 月,采用德国产 TDR 时域反射仪(Time Domain Reflectometry)测定 3 种林分的土壤体积含水量,每月中旬测定 1 次,深度为 3 m,每层 20 cm,共 15 层。

2.6 气象条件测定

在 2017 年生长季的 5—10 月,采用 HOB 气象站连续观测中庄和牛湾的日均气象指标值,包括气温(°)、空气相对湿度(%)和太阳辐射(w/m²)等。

2.7 数据分析方法

数据整理采用 Excel 2010 软件,数据分析采用

SPSS 19.0 软件。

3 结果与分析

3.1 不同林分的物种组成及草本生物量

2017 年生长季中期, 3 种林分内主要草本种类的特征及植被调查结果见表 2 和表 3。山杏柠条混交林群落的植物种类组成最丰富, 其他 2 种林分的植物

种类数较低且总数相近。除山杏纯林外, 其他 2 种林分的多年生草本与一年生草本伴生, 且多年生草本占绝对优势。

草本植物主要有 4 个类群: 禾本科植物、豆科植物、菊科植物和蔷薇科植物, 其中以菊科和蔷薇科植物所占比例稍高。

表 2 不同类型林分内草本植物的群落种类组成及地上生物量

林分 类型	群落种类组成						地上生物量		
	禾本科	豆科	菊科	蔷薇科	杂草类	总种数	干重/(t·hm ⁻²)	鲜重/(t·hm ⁻²)	干鲜比
山杏纯林	3	3	3	4	2	15	0.62	1.38	0.45
山杏×柠条	3	3	5	4	5	20	0.41	0.83	0.50
山杏×沙棘	3	2	4	4	3	16	0.86	1.95	0.44

表 3 3 种林分内主要草本植物的特征

草本 种类	山杏纯林			山杏×柠条			山杏×沙棘		
	高度/ cm	盖度/ %	密度/ (株·m ⁻²)	高度/ cm	盖度/ %	密度/ (株·m ⁻²)	高度/ cm	盖度/ %	密度/ (株·m ⁻²)
本氏针茅	14.40	3.33	34	10.93	10.00	39	17.4	5.33	16
达乌里胡枝子	8.30	4.00	11	8.03	6.67	11	14.6	14.00	11
百里香	5.13	32.00	70	3.77	6.33	19	18.13	18.00	20
西山委陵菜	3.07	3.67	35	2.93	5.33	25	5.93	16.00	62
糙隐子	4.90	1.67	3	5.03	12.67	45	6.40	4.33	8
委陵菜	4.87	6.00	9	6.47	8.67	15	8.57	1.67	3

在水分限制林木生长的半干旱黄土高原, 草本生物量是评价植被恢复程度及植被生产和生态功能的重要指标。通常生物量越大说明植被恢复越好。由表 2 可以看出, 山杏沙棘混交林的生物量最高, 比位于第 2 位的山杏纯林高 0.24 t/hm², 比位于第 3 的山杏柠条混交林高出 0.45 t/hm²。显著性分析显示, 除山杏纯林与山杏柠条混交林的林下草本生物量差异不显著外 ($p > 0.05$), 其余都呈显著差异 ($p < 0.05$), 可能是因柠条消耗了大部分土壤水分, 导致山杏柠条混交林内的草本生物量较低; 相比之下, 沙棘有固氮作用, 从而使林下草本生物量较高。

3.2 3 种林分内的草本物种多样性

重要值可较好地反映某个物种在群落中的优势地位和作用, 是确定群落中优势种的重要依据。山杏纯林内草本植物重要值 (%) 最大的是百里香

(27.199), 其次为本氏针茅 (14.761) 和西山委陵菜 (10.704) 等; 山杏柠条混交林内草本植物的重要值 (%) 大小依次为: 本氏针茅 (16.012)、糙隐子 (14.407)、达乌里胡枝子 (9.808) 等; 山杏沙棘混交林内草本植物的重要值 (%) 顺序为: 西山委陵菜 (19.002)、百里香 (17.385)、达乌里胡枝子 (13.070)、本氏针茅 (11.750) 等。表明 3 种林分内的草本优势种不完全相同, 但其中出现次数最多的是本氏针茅, 紧接着是西山委陵菜和达乌里胡枝子。

在 2017 年 7—8 月调查的 3 种林分的物种多样性总体表现出混交林的多样性指数和均匀度指数大于纯林, 山杏柠条混交林大于山杏沙棘混交林, 其中, 2 种混交林的 Pielou 均匀度指数相近; Margalef 丰富度指数为山杏柠条混交林大于其他 2 个林分, 但山杏纯林与山杏沙棘混交林的相同 (表 4)。

表 4 3 种典型植被的物种多样性指数

林分 类型	Pielou 均匀度指数	Alatalo 均匀度指数	Shannon-Wiener 多样性指数	Simpson 多样性指数	Margalef 丰富度指数
山杏纯林	0.822	0.724	2.279	0.873	3.257
山杏×柠条	0.848	0.814	2.540	0.914	4.126
山杏×沙棘	0.847	0.795	2.349	0.892	3.257

3.3 3 种林分冠层的降水再分配特征

研究期间的林外降雨量对山杏纯林、山杏沙棘混交林、山杏柠条混交林有所差别(表 5),分别为 433.8, 416.7,390.9 mm,3 种林分的穿透降雨率均很高,超过了 90%,尤其山杏沙棘混交林在 95%以上。3 种林分的干流量和截留量均较小,截留量约是干流量的 3 倍。山杏纯林的干流量及所占比例与山杏柠条混交林相差较小,但基本是山杏沙棘混交林的 2 倍,主要是由山杏沙棘混交林中山杏的地径明显低于山杏纯林和山杏柠条混交林,截留量的林分间差异与干流量基本相同。

研究期间不同时段内的穿透雨量(TF)与林外降雨量(P)存在较好的线性关系,拟合结果在山杏纯林为: $TF=0.9124P+0.2735(R^2=0.9979)$;山杏柠条混交林为: $TF=0.8972P+1.9528(R^2=0.9980)$;山

杏沙棘混交林为: $TF=0.9341P+1.1706(R^2=0.9987)$ 。山杏纯林的穿透率在生长季内呈波浪状变化,2 种混交林的穿透率大致表现为生长季前期大于后期。3 种林分的干流量(SF)与林外降雨量(P)呈很好的对数关系,其回归方程在山杏纯林为: $SF=0.8952\ln(P)-1.9421(R^2=0.8673)$;山杏柠条混交林为: $SF=0.8583\ln(P)-2.0268(R^2=0.8225)$;山杏沙棘混交林为: $SF=0.5386\ln(P)-1.2755(R^2=0.6727)$;干流率的季节变化不明显。树冠截留量(I)与林外降雨量(P)也具有对数关系,其拟合方程在山杏纯林为: $I=2.6906\ln(P)-6.4408(R^2=0.5794)$;山杏柠条混交林为: $I=3.2841\ln(P)-8.7370(R^2=0.5299)$;山杏沙棘混交林为: $I=1.8581\ln(P)-4.6154(R^2=0.4721)$;截留率随降雨量的变化特征与截留量大致相反。

表 5 3 种典型林分生长季内降水的冠层再分配特征

时段	山杏纯林						山杏柠条						山杏×沙棘								
	林外	穿透雨/	树干	截留量/	穿透率/	树干茎	截留率/	林外	穿透雨/	树干	截留量/	穿透率/	树干茎	截留率/	林外	穿透雨/	树干	截留量/	穿透率/	树干茎	截留率/
	降雨/mm	mm	茎流/mm	mm	%	流率/%	%	降雨/mm	mm	茎流/mm	mm	%	流率/%	%	降雨/mm	mm	茎流/mm	mm	%	流率/%	%
04-17—06-06	93.00	81.60	2.36	9.03	87.75	2.54	9.71	86.50	79.18	1.87	5.45	91.54	2.16	6.30	90.80	87.62	1.68	1.50	96.49	1.85	1.65
06-07—07-06	52.80	48.81	1.71	2.28	92.44	3.24	4.32	51.50	46.42	0.79	4.29	90.14	1.54	8.32	54.00	52.02	0.54	1.44	96.33	1.00	2.67
07-07—08-11	53.50	50.08	0.97	2.45	93.61	1.80	4.59	39.00	37.51	1.07	0.42	96.18	2.74	1.08	53.30	52.70	0.54	0.06	98.88	1.01	0.11
08-12—09-08	131.00	119.94	2.36	8.70	91.55	1.80	6.64	117.50	104.72	2.03	10.76	89.12	1.72	9.15	125.50	116.75	1.01	7.73	93.03	0.81	6.16
09-09—09-28	8.30	7.50	0.30	0.51	90.31	3.59	6.10	12.20	10.66	0.28	1.26	87.41	2.27	10.32	10.56	10.06	0.20	0.31	95.25	1.86	2.89
09-29—10-26	95.20	89.80	2.36	3.04	94.33	2.48	3.19	84.20	78.53	2.21	3.46	93.27	2.62	4.11	82.50	78.24	1.39	2.87	94.84	1.68	3.48
04-17—10-26	433.80	397.73	10.06	26.01	91.68	2.32	6.00	390.90	357.03	8.24	25.63	91.34	2.11	6.56	416.66	397.39	5.36	13.91	95.38	1.29	3.34

3.4 3 种林分的林下蒸散特征

从表 6 可以看出,研究期间的林下蒸散为山杏沙棘混交林(245.01 mm) > 山杏纯林(227.68 mm) > 山杏柠条混交林(220.85 mm),占同期降雨量的比率分别为 58.80%,52.49%,56.50%。

3 种林分的林下蒸散月际变化相似,7 月最大,占研

究期间总蒸散的 30%,5—6 月的 > 8—10 月的,呈明显的单峰变化特征。山杏柠条混交林的林下蒸散在 6—7 月低于其他 2 种森林,在 8—10 月则稍高于其他 2 种森林;山杏柠条混交林最大的月际差值为 47.03 mm,明显小于其他 2 种林分(64.41,69.94 mm),说明山杏柠条混交林对外界环境变化的响应相对不敏感。

表 6 3 种林分的林下蒸散的月际变化

单位:mm

林分类型	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	5—10 月
山杏纯林	31.25	46.42	77.70	29.56	29.46	13.29	227.68
山杏×柠条	37.10	40.08	62.34	30.02	36.02	15.30	220.85
山杏×沙棘	47.15	48.34	79.62	27.29	32.93	9.67	245.01

3.5 3 种林分内草本盖度和高度的季节变化

从图 1 可以看出,3 种林分内草本盖度与高度的季节变化均呈先升高后降低的单峰变化,在第 200 天左右时达到最大,其中高度的变异比盖度更剧烈。3 种林分的林下草本盖度相差较小,但山杏纯林的在生长季早期和中期较高,2 种混交林在生长季后期较高。山杏沙棘混交林的林内草本高度明显高于其他森林,这可部分解

释其较高的林下蒸散。

3.6 3 种林分土壤湿度的变化特征

3 种林分的生长季中前期(3—7 月)的土壤体积含水量其变化特征见图 2。受降雨等气象条件、表层土壤蒸发和植被蒸腾等的影响,中上层(0—60/80 cm)土壤体积含水量总体呈现出随深度增加逐渐减小的趋势,山杏柠条混交林的变幅最小,其他 2 种森

林变幅较大。深层(60/80—300 cm)土壤体积含水量总体表现出随土层加深而逐渐增加的变化趋势,山杏纯林的土壤湿度最大,山杏柠条混交林最小。在深层

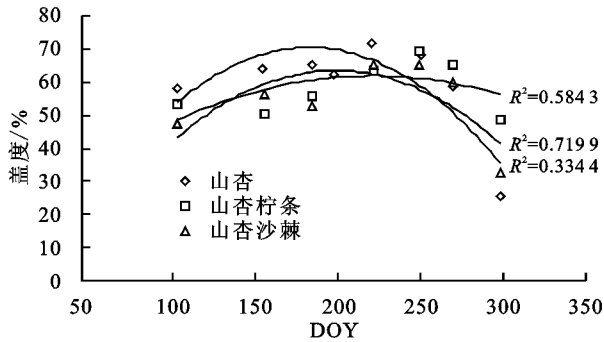


图1 3种林分内草本植物的盖度和高度的生长季内变化

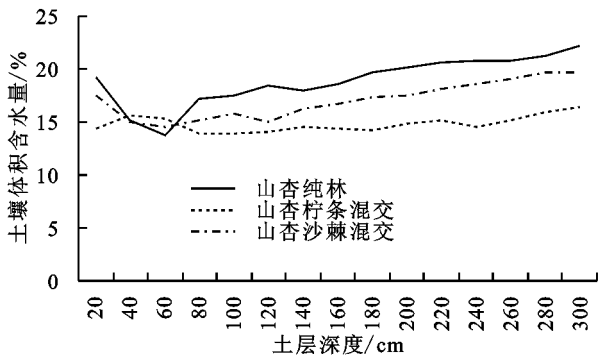


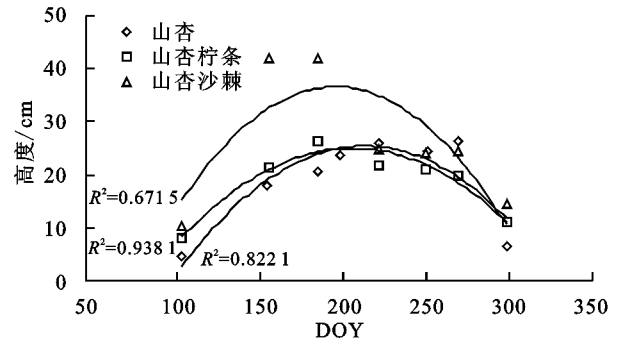
图2 3种森林生长季中前期的土壤体积含水量随土壤深度的变化

4 讨论

4.1 3种森林草本生物量与物种多样性的差异

在3种森林中,山杏沙棘混交林的草本生物量最高,可能是因其林冠层郁闭度最低,利于林下草本生长,而且沙棘是豆科植物,其固氮作用也会促进草本生长;山杏柠条混交林土壤湿度相对较差导致其草本生物量最低,这与张千千等^[25]的研究结果基本相同。干旱地区草本生物多样性是评价生态系统结构和生态修复成效的重要指标,因为多样性高时利于生态系统稳定和功能持续发挥。本研究表明,总体上是山杏柠条混交林的生物多样性大于山杏沙棘混交林,混交林的均匀度和多样性又大于纯林,孙浩等^[26]在六盘山研究发现华北落叶松+灌木复层林的草本丰富度和均匀度大于纯林,与本研究相同;赵娜等^[27]、曲红等^[28]在晋西黄土丘陵区分析出混交林比纯林利于林下植被物种多样性的增加,与本文结果相似。在相同研究地点气候影响^[29]基本一致时,林下草本的物种多样性主要和冠层结构^[30]等有很大关系,2个混交林的林冠郁闭度较小,林下光照较好,利于提高林下草本的物种多样性,但仍需进一步探讨更深层次的机理。

土壤水分蓄积方面,山杏纯林最好,山杏柠条混交林最差,主要因为林下柠条和沙棘的生长消耗了大量水分^[23-24],且柠条消耗水分多于沙棘。



4.2 3种森林水文影响的差异及影响

林冠层对降雨再分配的作用受到郁闭度和叶面积指数等植被特征以及降雨量、降雨强度等降雨特征的综合影响^[31-33],在降雨特征相同时植被特性差异会导致降雨再分配差异。本研究中,山杏沙棘混交林的截留率低于其他两者,主要是因山杏冠层郁闭度(密度)较小,与王磊等^[5]的研究结果相同。本研究样地中的柠条呈带状主要分布在山杏树冠下方,沙棘生长也很弱,高盖度均较小,因此本研究未涉及沙棘和柠条的降雨再分配作用,需未来继续研究。

林下蒸散与林木蒸腾同是林分蒸散耗水的重要组分,均受林冠特征、气象条件、土壤湿度的影响。李振华等^[34]在宁夏六盘山研究显示,林下蒸散在8月最大,主要是受降雨量的影响;本文在7月达到最高,这可能和研究期间的气象条件及土壤水分条件差异有关。本研究中,生长季前期的林下蒸散大于后期,可能主要受气象条件和土壤水分条件的月份差异影响。山杏沙棘混交林的林下草本植物的高度(林冠层郁闭度)大于(小于)他2种林分,影响到不同林分林下蒸散的差异;3种林分的草本生物量大小顺序与林下蒸散相同,说明草本生物量较高时必然消耗水分较多;山杏柠条混交林的土壤湿度较低且季节变化幅度较小,也是导致其林下蒸散季节变化较小、生长季总蒸散低于其他2种林分的原因。

维持较好的土壤水分条件,是黄土高原植被生存与生长的必要和紧缺条件。表层土壤水分主要受到降雨、太阳辐射等气象条件以及植被蒸散影响,而深层土壤水分主要受植被蒸散影响^[35-37],且变化缓慢,且在本地研究2007—2011年土壤湿度时空差异时发现,80—180 cm为土壤水分相对稳定层^[38],变化很小。王力等^[39]依据土壤含水量将黄土高原土壤干层分为3级,强烈干燥化土层:土壤含水量<5%;中

等干燥化土层 5%~8%;弱干燥化土层 8%~10%;本研究区土壤含水量现状均在 10%以上,但植被种类配置(蒸散耗水)的不同导致土壤含水量存在很大差异,要想达到土壤湿度持续稳定且平衡的前提下,必须要考虑植物种的搭配。本研究发现,山杏纯林的深层土壤水分最好,山杏柠条混交林最差,说明混交林的较高植被生物量(林冠层+林下草本层)消耗了更多土壤水分。3种林分的草本层覆盖度相差不多,变化在 0.62~0.69,其减少土壤侵蚀的功能相近^[40-41],说明依据土壤水分条件适当降低林木密度,有助于在有效减少土壤侵蚀的同时维持较好的抗蚀功能与植被的水分稳定性。在植被恢复中选择合理植被结构时如何兼顾生态系统稳定性和土壤水库稳定性,实现植被生长的可持续性,还需更多研究。

本研究中每种林分类型仅设置一个标准样地,不能定量分析植被结构对生态和水文功能的影响,只能进行 3 种具有代表性的林分结构对生态水文功能差异影响的简单比较,在以后的研究中,还需要增加更多的样地和植被种类,为更进一步探讨和摸索该区植被类型和林分结构对生态与水文影响增加可信度和说服力。坡向和坡位是影响植被生长、林分结构和生态水文功能发挥的地形因子,起着间接作用,本研究属于黄土高原梁峁丘陵地,坡长一般都较短,坡位差异影响较小;坡向会影响太阳辐射、温度、降雨等气象条件进而影响植被生长与恢复,研究样地的直线距离都很近,坡向和坡位在一定程度上影响研究结果和可比性,但毕竟影响也是有限的,在可控制的范围内。本文并未涉及乔灌层的蒸腾,无法计算林地总蒸散和林地水量平衡,在未来的研究和讨论中应加强该部分内容的分析。

5 结论

(1)3种林分的草本覆盖度变化在 0.62~0.69,差异很小;山杏沙棘混交林的草本植物地上生物量和高度均大于其他 2 种林分;山杏纯林的物种多样性指标低于混交林,其中山杏柠条混交林优于山杏沙棘混交林。

(2)3种林分的穿透降雨量很大,穿透率均大于 90%,其中沙棘最大,为 95.38%;山杏纯林的截留量及截留率与山杏柠条混交林大致相近,基本为山杏沙棘混交林的 2 倍,干流量的林分间差异与截留量相似。

(3)山杏沙棘混交林的林下蒸散量大于其他 2 种林分,是因生物因素(草本植物的高度、生物量、林冠层的密度、郁闭度)造成的;山杏柠条混交林对外界环境变化的响应相对不敏感,林下蒸散的月际间差异小

于其他 2 种林分。

(4)生长季中前期(3—7月)深层(60/80—300cm)土壤体积含水量林分差异为山杏纯林>山杏沙棘混交林>山杏柠条混交林,主要是由林木蒸腾耗水量差异决定的。

(5)综合分析表明,在本区植被恢复过程中,既要考虑土壤水库和生态系统的稳定性,也要兼顾植被的生态功能、水文功能等,在植被合理搭配中优先选择山杏沙棘混交林和山杏纯林。

参考文献:

- [1] 时忠杰,王彦辉,于澎涛,等.宁夏六盘山林区几种主要森林植被生态水文功能研究[J].水土保持学报,2005,19(3):134-138.
- [2] 江森华,吕茂奎,胥超,等.亚热带米楮次生林和杉木人工林林冠截留特征比较[J].水土保持学报,2017,31(1):116-121.
- [3] Bulcock H H, Jewitt G P W. Field data collection and analysis of canopy and litter interception in commercial forest plantations in the KwaZulu-Natal Midlands, South Africa[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012,16(10):3717-3728.
- [4] He Z B, Yang J J, Du J, et al. Spatial variability of canopy interception in a spruce forest of the semiarid mountain regions of China[J]. Agricultural and Forest meteorology,2014,188(15):58-63.
- [5] 王磊,孙长忠,周彬.北京九龙山不同结构侧柏人工纯林降水的再分配[J].林业科学研究,2016,29(5):752-758.
- [6] 于立忠,王利,刘利芳,等.浑河上游典型水源涵养林降雨再分配过程[J].水土保持学报,2016,30(6):106-110.
- [7] 马国飞,满苏尔·沙比提,张雪琪.托木尔峰自然保护区台兰河上游不同植被类型的水源涵养功能[J].水土保持学报,2018,32(1):210-216.
- [8] 孙浩,刘晓勇,何齐发,等.修河上游流域 4 种森林类型的水源涵养功能评价[J].水土保持研究,2017,24(4):337-341.
- [9] 刘凯,贺康宁,田贇,等.青海高寒山区 5 种林分的土壤特性及其水源涵养功能[J].水土保持学报,2017,31(3):141-146.
- [10] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: Effect of forest type, ground cover and climate[J]. Hydrological Processes,2000,14(16/17):2903-2920.
- [11] Bruijnzel L A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2004,104(1):185-228.
- [12] 王会利,唐玉贵,韦娇媚.低效林改造对土壤理化性质及水源涵养功能的影响[J].中国水土保持科学,2010,

- 8(5):72-78.
- [13] Dietz J, Hölscher D, Leuschner C, et al. Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 237(1):170-178.
- [14] 胡晓聪,黄乾亮,金亮. 西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(1):55-63.
- [15] 刘凯,贺康宁,王先棒. 青海高寒区不同密度白桦林枯落物水文效应[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(1):89-97.
- [16] 刘贤德,张学龙,赵维俊,等. 祁连山西水林区亚高山灌丛水文功能的综合评价[J]. *干旱区地理*, 2016, 39(1):86-94.
- [17] 王正安,邸利,王彦辉,等. 六盘山叠叠沟小流域4种植被土壤层水文调节功能的综合评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(11):181-187.
- [18] 冯琦雅,陈超凡,覃林,等. 不同经营模式对蒙古栎天然次生林林分结构和植物多样性的影响[J]. *林业科学*, 2018, 54(1):12-21.
- [19] 姚甲宝,曾平生,袁小平,等. 间伐强度对木荷—萌芽杉木中龄混交林生长和林分结构的影响[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(3):511-517.
- [20] 张源润,蔡进军,董立国,等. 半干旱退化山区坡改梯地土壤养分变异特征研究:以宁夏彭阳县为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(3):121-124.
- [21] 王月玲,蔡进军,张源润,等. 半干旱退化山区不同生态恢复与重建措施下土壤理化性质的特征分析[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(1):11-14.
- [22] 马克平,刘玉明. 生物群落多样性的测度方法[J]. *生物多样性*, 1994, 2(4):231-239.
- [23] 卢建利,陈云明,张亚莉,等. 黄土丘陵半干旱区沙棘生长对土壤水分及养分影响[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(3):137-140.
- [24] 郭忠升. 半干旱区柠条林利用土壤水分深度和耗水量[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(5):69-72.
- [25] 张千千,王彦辉,缪丽萍,等. 六盘山叠叠沟小流域草地上生物量的空间变化及其与环境因子的关系[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(4):82-87.
- [26] 孙浩,杨民益,余杨春,等. 宁夏六盘山几种典型水源涵养林林分结构与水文功能的关系[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(1):10-18.
- [27] 赵娜,查同刚,周志勇. 晋西黄土区不同树种配置对林下植被物种多样性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(3):44-45.
- [28] 曲红,王百田,王棣,等. 黄土区不同配置人工林物种多样性研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(4):843-848.
- [29] 朱桂丽,李杰,魏学红,等. 青藏高寒草地植被生产力与生物多样性的经度格局[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(2):210-222.
- [30] 曾晓阳,高永恒. 青城山常绿阔叶林冠层结构对植被生物多样性的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2017, 52(2):65-70.
- [31] Ghimire C P, Bruijnzeel L A, Lubczynski M W, et al. Measurement and modeling of rainfall interception by two differently aged secondary forests in upland eastern Madagascar[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 545(12):212-225.
- [32] Iida S, Levia D F, Shimizu A, et al. Intrastorm scale rainfall interception dynamics in a mature coniferous forest stand[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 548(3):770-783.
- [33] 刘泽彬,王彦辉,田奥,等. 六盘山半湿润区坡面华北落叶松林冠层截留的时空变化及空间尺度效应[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5):231-239.
- [34] 李振华,王彦辉,于澎涛,等. 六盘山半干旱区华北落叶松林的生长季蒸散量和组分特征[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(2):222-228.
- [35] Wang Y Q, Shao M A, Shao H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 381(1):9-17.
- [36] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(4):437-448.
- [37] Yang L, Wei W, Chen L, et al. Spatial variations of shallow and deep soil moisture in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(9):3199-3217.
- [38] 蔡进军,张源润,潘占兵,等. 宁夏黄土丘陵区苜蓿土壤水分的时空变异特征[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1):75-79.
- [39] 王力,邵明安,张青峰. 陕北黄土高原土壤干层的分布和分异特征[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(3):436-442.
- [40] 方广玲,香宝,赵卫,等. 基于GIS和RUSLE的拉萨河流域土壤侵蚀研究[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3):6-12.
- [41] 杨春霞,肖培青,甄斌,等. 野外不同被覆坡面产流产沙特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4):28-36.