

晋西黄土残塬沟壑区刺槐人工林土壤水分植被承载力研究

王宁¹, 毕华兴^{1,2,3,4,5,6}, 郭孟霞⁷, 孔凌霄¹, 侯贵荣¹, 常译方⁸

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,山西 吉县 042200;3.北京林果业生态环境功能提升协同创新中心,北京 102206;4.水土保持国家林业局重点实验室(北京林业大学),北京 100083;5.北京市水土保持工程技术研究中心(北京林业大学),北京 100083;6.林业生态工程教育部工程研究中心(北京林业大学),北京 100083;7.北京水保生态工程咨询有限公司,北京 100055;8.北京市八一学校,北京 100080)

摘要:为明确在干旱缺水地区,植被对深层土壤水分的过度消耗以及水资源的承载能力,在晋西黄土残塬沟壑区选取林分密度 1 300 株/hm² 的刺槐人工林为研究对象,以裸地为对照,利用 Enviro-SMART 土壤水分监测系统(FDR)和热扩散探针(TDP)技术对当地刺槐人工林地 0—150 cm 范围内各土层体积含水量与树干液流量进行长期连续定位观测,采用土壤有效水与单株刺槐耗水量的比值来衡量研究区刺槐人工林土壤水分植被承载力。结果表明:(1)月降水量和月土壤储水量是决定刺槐人工林土壤水分植被承载力的主要环境因子,且二者与土壤水分植被承载力之间均呈现显著的正比例关系($P < 0.05$)。(2)根据构建的刺槐人工林土壤水分植被承载力模型,计算出当地林龄为 19 年的刺槐人工林 0—150 cm 土层深度的土壤水分植被承载力为 1 224 株/hm²,稍小于研究区实际林分密度(1 300 株/hm²),为保证当地刺槐人工林分耗水深度控制在 0—150 cm 土层范围内,同时也为促进当地林分生产力处于最优水平,建议在今后的营林造林过程中将刺槐人工林密度控制在当地土壤水分植被承载力范围之内,在减少林地深层水分消耗、调整林地土壤水资源平衡的同时,促进当地林业产业的合理发展。

关键词:晋西黄土残塬沟壑区;刺槐;土壤水分植被承载力;合理密度

中图分类号:S725.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)06-0213-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.030

Study on Soil Water Vegetation Carrying Capacity of *Robinia pseudoacacia* Plantation in the Loess Gully Area of Western Shanxi Province

WANG Ning¹, BI Huaxing^{1,2,3,4,5,6}, GUO Mengxia⁷, KONG Lingxiao¹, HOU Guirong¹, CHANG Yifang⁸

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Ji County Station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Jixian, Shanxi 042200; 3.Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-environmental Improvement with Forestry and Fruit Trees, Beijing 102206; 4.Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 5.Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 6.Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 7.Beijing Water and Soil Conservation Ecological Project Consulting Co., Ltd., Beijing 100055; 8.Beijing Bayi School, Beijing 100080)

Abstract: In order to clarify the excessive consumption of deep soil moisture by vegetation and the carrying capacity of water resources in arid and water-deficient areas, the *Robinia pseudoacacia* plantation with a stand density of 1 300 trees/hm² was selected as the research object in the gully area of the Loess Plateau in Western Shanxi Province, and the bare land was taken as the control. The volumetric water content of soil layers in the 0—150 cm range and trunk sap flow of the local *R. pseudoacacia* plantation were continuously observed by using Enviro-SMART soil moisture location monitoring system and thermal diffusion probe (TDP). Using the ratio of available soil water to water consumption per plant of *R. pseudoacacia* to measure the carrying capacity of soil water and vegetation of *R. pseudoacacia* plantation in the study area. The results showed that: (1) Monthly precipitation and monthly soil water storage were the main environmental factors determining soil water and vegetation carrying capacity of *R. pseudoacacia* plantation, and there was a

收稿日期:2019-05-31

资助项目:国家重点研发计划项目“黄土残塬沟壑区水土保持型景观优化与特色林产业技术及示范”(2016YFC0501704);2019 校专项—科技创新服务能力建设—科研基地建设—林果业生态环境功能提升协同创新中心(2011 协同创新中心)(市级)(PXM2019_014207_000099)

第一作者:王宁(1994—),男,硕士研究生,主要从事林业生态工程研究。E-mail: 18754808751@163.com

通信作者:毕华兴(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事水土保持与林业生态工程研究。E-mail: bhx@bjfu.edu.cn

significant positive relationship between them and soil water and vegetation carrying capacity ($P < 0.05$). (2) According to the soil water and vegetation carrying capacity model of *R. pseudoacacia* plantation, the soil water and vegetation carrying capacity of 0—150 cm soil layer depth of *R. pseudoacacia* plantation with 19 years of local age was calculated to be 1 224 plants/hm², slightly less than the actual stand density of the study area (1 300 plants/hm²). In order to ensure that the water consumption depth of the local *R. pseudoacacia* plantation is controlled within the 0—150 cm soil layer, and to promote the productivity of the local stand at the optimal level, it is suggested that the density of the plantation should be controlled within the carrying capacity of the local soil moisture and vegetation in the future afforestation process, so as to reduce the deep water consumption of the forest land and adjust the balance of soil water resources in the forest land, and promote the rational development of local forestry industry.

Keywords: Loess Residual Plateau Gully Area of Western Shanxi Province; *Robinia pseudoacacia*; soil moisture and vegetation carrying capacity; rational density

水资源是人类社会赖以生存和发展的最重要自然资源之一,作为影响植物生长发育的关键因子,直接决定了林地所能承受的植物种类、数量和格局^[1]。黄土高原位于干旱、半干旱地区,其降水量少且时空分布不均、水分蒸发量大、植被稀少、水资源的缺乏等问题严重制约着该地区的发展与振兴,属我国生态建设重点和难点地区。若要使黄土高原实现生态功能的自我修复,必须对林分和土壤水分的关系进行适时适量的调控^[2-3]。

近年来,人们对于土壤水分植被承载力的认识缺乏科学性^[3-4],在黄土高原生态环境改善工作取得显著成效的同时,也出现了人工林地和人工草地的土壤干层现象^[4-6]。在黄土高原地区进行植被建设是否会恶化当地深层土壤水分状况成为当前研究中需要担忧的重点问题,同时对该地区土壤水分植被承载力的研究受到国内外科研人员的持续关注^[5,7]。

土壤水分植被承载力是指某一地区的某种植物在其生命期的某一时段内,以在现有的条件下维护水分生态平衡和可持续发展为前提,该地区土壤水分的降水补给量能够支撑植物群落健康生长的最大植物数量,是用来限制植物生长的重要指标^[8]。郭忠升等^[9-10]首次提出了土壤水分植被承载力的概念,并以黄土丘陵区柠条作为研究对象,建立了适用于当地柠条林的土壤水分植被承载力初步数学模型;刘建立等^[11]以叶面积指数为指标,主要定量研究了宁夏六盘山叠叠沟小流域典型阴坡坡面上的植被承载力及其坡位变化。目前,量化土壤水分植被承载力的模型主要有经典的承载力模型^[12],种群增长通用数学模型^[13],密度—土壤水分模型^[14]和基于物理过程的土壤水分植被承载力模型^[15]。同时对一定土壤水分条件下土地所能承载植被数量的研究多集中在灌木与草本植物^[2],而在获取乔木生物量、控制植被密度以及确保乔木研究时间的连续性等方面均存在一定困难^[9],相关研究仍相对较少,运用土壤水分植被承载

力指导实际林业生产建设过程的研究就更为匮乏。

基于此,本文依据水量平衡原理和经典的土壤水分植被承载力模型,以晋西黄土残塬沟壑区典型刺槐人工林(1 300 株/hm²)为研究对象,以裸地作为对照,运用 Enviro-SMART 土壤水分监测系统(FDR)监测 3 种降水年型条件下、土层深度 0—150 cm 范围内刺槐林地土壤水分的动态变化,同时利用热扩散探针(TDP)技术实时监测刺槐的树干液流速率,保证数据的长期性和连续性,明确刺槐耗水量。计算单位体积土壤供给植物的土壤有效水与单株植物耗水量的比值,得出研究区刺槐林土壤水分植被承载力,以期通过合理的林分密度调控,为黄土高原地区合理利用降水资源,缓解深层土壤水分亏缺提供理论依据和现实指导。

1 研究区概况

研究区位于山西省吉县蔡家川流域(36°14′—36°18′N,110°40′—111°48′E),是典型的黄土残塬沟壑区。其海拔高程为 800~1 600 m,平均海拔 1 168 m,属暖温带大陆性气候,年降水量 575.9 mm,降雨季节分配不均,其中雨季(6—9 月)降雨量约占全年降雨量的 70%(403.1 mm)。土壤类型主要为褐土,黄土母质。蔡家川流域上游(最高海拔为 1 600 m)为土石山区,以天然混交林草植被为主;流域中下游为黄土丘陵沟壑区,主要以天然混交林草植被、人工防护林体系和农田生态系统为主。乔木树种主要包括刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)、山杨(*Populus davidiana*)等;灌木树种主要包括酸枣(*Ziziphus jujuba*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、荆条(*Vitex negundo*)、黄刺玫(*Rosa hugonis*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)等;主要的草本植物有狗尾草(*Setaria viridis*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)、细叶苔草(*Carex rigescens*)、铁杆蒿(*Ar-*

temisia gmelinii)等。

2 研究方法

2.1 试验设计

根据研究区刺槐人工林适宜密度的研究结果^[16-17],同时结合大量的实地踏查,在试验流域中选取海拔高度为1 118 m,坡度为23°,坡向为南偏东34°的坡面,建立1个密度为1 300株/hm²,林龄为19年的刺槐人工林标准径流小区(水平面积5 m×20 m,平均树高8.5 m,平均胸径12.3 cm),1个裸地标准径流小区作为对照,在各标准径流小区下方安装集水堰箱和雷达式水位计。分别在各小区中心位置布设1个观测点,采用Enviro-SMART土壤水分监测系统(FDR)对土壤水分实行长期连续性观测。裸地小区采用遮阴网对其进行遮阴处理,尽量保证和刺槐林地的遮阴度相同。在刺槐小区内进行每木调查,选择3株生长良好、树干通直、无被挤压的刺槐标准木为研究对象,应用热扩散径流计(TDP)对其液流速率进行连续监测^[18-20],每15 min测定1次。

2.2 土壤水分数据监测

观测土壤水分采用Enviro-SMART土壤水分定位监测系统(FDR)进行,该系统能实现全天自动实时监测,观测土层深度为0—150 cm,分为0—10,10—20,20—40,40—70,70—100,100—120,120—150 cm 7个观测层;土壤水分观测频率为1次/30 min。同时,利用土钻采集土样,通过烘干称重法计算各小区土壤质量含水量,用来标定FDR所测定的土壤体积含水量,保证数据的准确性。

2.3 树干液流和降水量的测定

以刺槐标准木每日的树干液流流量均值为基础进行单株刺槐月耗水量的计算。降水量数据通过设立于小区附近空旷地内的翻斗式自记雨量计(RG3—M自计式雨量筒,美国,Onset公司)进行观测,利用HOBO计数器实现降水量和降水历时的同步监测。

2.4 地表径流的测定

采用集水堰箱和雷达式水位计(CS475雷达水位计,美国,Campbell公司)这2种方式进行坡面径流测定,二者对比较正测定结果。集水堰箱内放置压力式自记水位计,标定水位,自记水位计每5 min记录1次水位,数据自动保存在水位计自带存储器中,每月用电脑将自记水位计和雷达式水位计的数据导出,利用已标定的水位—流量关系式计算径流量。

2.5 土壤水分植被承载力的计算

2.5.1 土壤储水量的计算 林地内土壤水分主要用于林木蒸腾和土壤蒸发,由于刺槐林下植被的蒸腾量在总林分蒸腾量中占比较小^[21-22],故将其忽略以方便计算。同时由于研究区土层深厚,无壤中流,地下水

埋藏较深,深层土壤水分垂直变化较小^[2],利用FDR监测0—150 cm土层深度范围内各土层体积含水量,则各层储水量的计算公式为:

$$W_i = \theta_i \times D_i \quad (1)$$

总土壤储水量计算公式为:

$$W = \sum_{i=1}^7 \theta_i \times D_i \quad (2)$$

式中: W_i 为各土层土壤储水量(mm); θ_i 为第*i*层监测的土壤体积含水量(%); D_i 为各土层厚度(mm); W 为0—150 cm土层的总土壤储水量(mm)。

2.5.2 刺槐人工林地蒸散发总量及裸地土壤蒸发量

根据水量平衡方程,研究年限内各月刺槐人工林0—150 cm深度范围内的林地蒸散发总量为:

$$E = W_{初} + P - R - W_{末} \quad (3)$$

式中: E 为刺槐人工林地蒸散发总量(mm); P 为降水量(mm); R 为地表径流量(mm); $W_{初}$ 为月初土壤储水量(mm); $W_{末}$ 为月末土壤储水量(mm)。

裸地土壤蒸发量的计算方法与上述林地蒸散发总量的计算方法一致。

2.5.3 土壤有效水 土壤有效水原指用于土壤中可以植物有效利用的水分,本研究中特指土壤供给刺槐进行蒸腾活动的土壤水分,为刺槐人工林地土壤蒸散发总量与对照小区土壤蒸发量的差值。

2.5.4 刺槐耗水量 树干液流量的计算公式:

$$F_h = A_s \times V \quad (4)$$

式中: F_h 为单位时间内的树干液流量(cm³/h); A_s 为树干平均边材面积(cm²); V 为树干液流平均速率(cm/h)。

单株刺槐的月耗水量和年耗水量:

$$F_m = \sum_{i=1}^d \sum_{n=1}^{24} F_h / A_c \times 10^{-3} \quad (5)$$

$$F_y = \sum_{m=1}^{12} F_m \quad (6)$$

$$F_{sm} = F_m \times S \quad (7)$$

$$F_{sy} = F_y \times S \quad (8)$$

式中: F_m 为单株刺槐月耗水量(mm); F_y 为刺槐单株年耗水量(mm); d 为当年实际测量天数; n 为当天实际测量小时数; A_c 为林冠投影面积(m²); m 为实测月份; F_{sm} 为单位面积内刺槐月耗水总量(mm); F_{sy} 为单位面积内刺槐年耗水总量(mm); S 为刺槐林密度(株/hm²)。

2.5.5 刺槐林地土壤水分植被承载力 刺槐人工林地0—150 cm土壤水分月植被承载力与年植被承载力的计算公式为:

$$C_m = W_m / F_m \quad (9)$$

$$C_y = W_y / F_y \quad (10)$$

式中: C_m 为刺槐林地月植被承载力(株/hm²); C_y 为刺槐林地年植被承载力(株/hm²); W_m 为刺槐人工林

地的月土壤有效水(mm); W_y 为刺槐人工林地的年土壤有效水(mm)。

2.6 研究年份的选择

根据王孟本等^[23]的划分方法,将降水量划分为5级判别标准:距平均值百分率 $\pm 15\%$ 范围内的降水量为正常水平,定义为平水年;降水量距平均值百分率 $\pm 15\% \sim \pm 40\%$ 为偏少或偏多,分别为干旱年和丰水年; -40% 以下为极端干旱年, $+40\%$ 以上为极端丰水年。为避免数据的偶然性,本研究选取2012年、2016年和2017年分别代表研究区不同降水年型,其中2012年为干旱年,降水量为409.2 mm;2016年为平水年,降水量为548.3 mm;2017年为丰水年,降水量为667.4 mm。

3 结果与分析

3.1 刺槐林地蒸散发总量变化特征

刺槐耗水量、裸地土壤蒸发量和林地蒸散发总量的变化见图1。总体上三者均呈现出明显的月际变化规律,即生长季蒸散发总量明显大于非生长季蒸散发总量,且峰值多出现于7—9月。从年际变化来看,3种降水年型下刺槐耗水总量分别为237.14 mm(干旱年)、243.55 mm(平水年)、250.87 mm(丰水年),裸地蒸发量分别为378.15 mm(干旱年)、424.41 mm(平水年)、531.21 mm(丰水年),林地蒸散发总量分别为498.68 mm(干旱年)、531.21 mm(平水年)、570.35 mm(丰水年)。

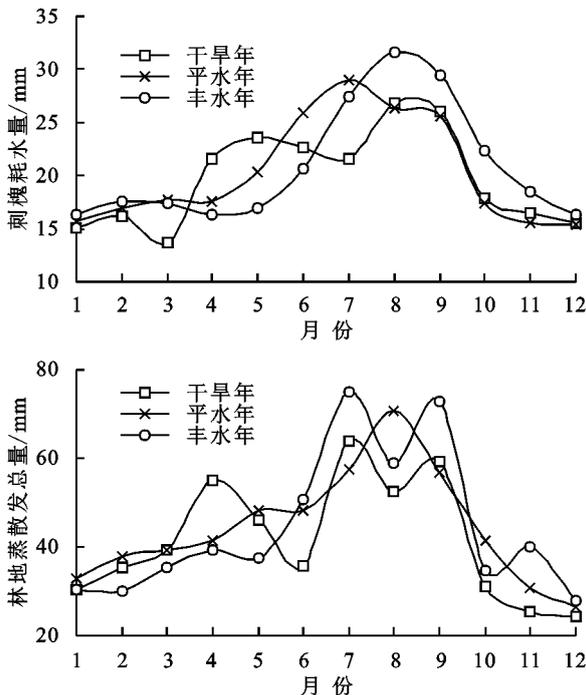
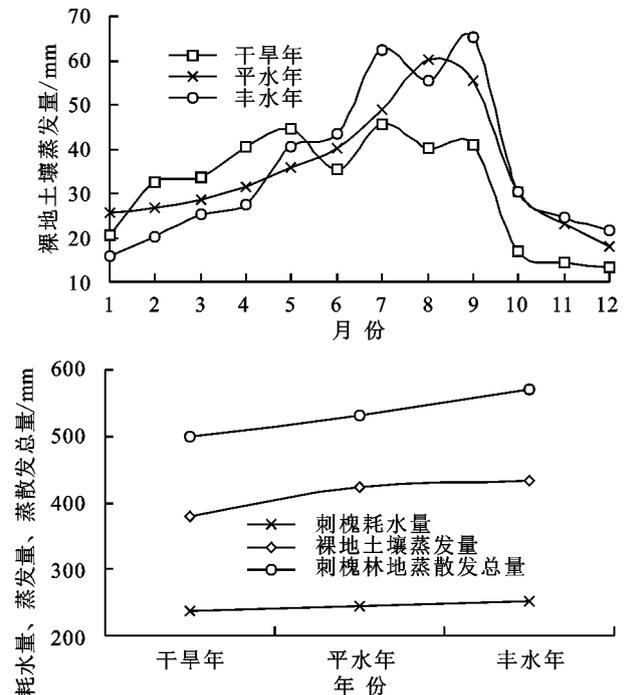


图1 刺槐耗水量、裸地土壤蒸发量与林地蒸散发总量的变化

3.2 刺槐人工林土壤水分植被承载力

3种降水年型下刺槐人工林土壤水分植被承载力逐月变化见表1和图2。干旱年年内平均土壤水分植被承载力仅为908株/ hm^2 ,各月土壤水分植被承载力均低于

mm(丰水年),刺槐耗水量分别占林地蒸散发总量的47.55%,45.84%,43.99%,裸地蒸发量分别占林地蒸散发总量的75.83%,79.90%,75.88%,刺槐耗水量和裸地土壤蒸发量之和分别为林地蒸散发总量的1.23,1.25,1.19倍。可见刺槐耗水量、裸地土壤蒸发量和林地蒸散发总量虽会随着年降水量的增加而增加,但三者之间的比例关系不会随年降水量变化出现显著差异($P > 0.05$),即刺槐耗水量和裸地土壤蒸发量之和约为林地蒸散发总量的1.2倍。其原因除了裸地土壤蒸发量高于刺槐林地土壤蒸发量以外,主要是因为林地蒸散发总量的计算范围选取的是土层深度0—150 cm的范围,而当该土层范围内土壤有效水分无法满足刺槐林分自身蒸腾需要时,就会促使深层土壤水分在毛吸力的作用下向上运动,从而满足林分耗水需求,进而引发黄土高原地区深层土壤“干化”现象的出现,严重时甚至会导致土壤干层的发生。刺槐林根系主要分布在0—60 cm土层深度范围内,最大有效根长密度在土壤垂直剖面0—30 cm范围内^[22],研究土层深度0—150 cm范围内土壤水分变化符合研究区刺槐林的实际情况。因此,当前需对研究区刺槐人工林林分密度进行合理调控,以减少林分消耗的土壤水分总量,将林分耗水深度控制在0—150 cm的范围内,保持刺槐林地土壤水分处于供耗平衡状态,以防止深层土壤(> 150 cm)“干化”现象的发生。



刺槐人工林实际密度(1 300株/ hm^2),表明干旱年刺槐人工林密度明显偏高,0—150 cm土层范围内的土壤水分无法有效满足刺槐林分的蒸腾耗水需要,不仅对深层土壤水分产生一定程度的消耗,而且限制了刺槐自身的

正常生长,严重时会导致刺槐林分的退化,出现个体枯 萎、衰老甚至是死亡的现象^[22]。

表 1 刺槐林地土壤水分植被承载力特征

年份	植被承载力/(株·hm ⁻²)												平 均值
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
干旱年	859	580	820	919	795	924	973	1094	1043	1030	880	977	908
平水年	1154	914	1272	981	752	1298	1465	1116	995	1075	1189	1062	1106
丰水年	1399	1241	1296	1153	1161	1234	2212	1436	1424	1604	927	883	1331

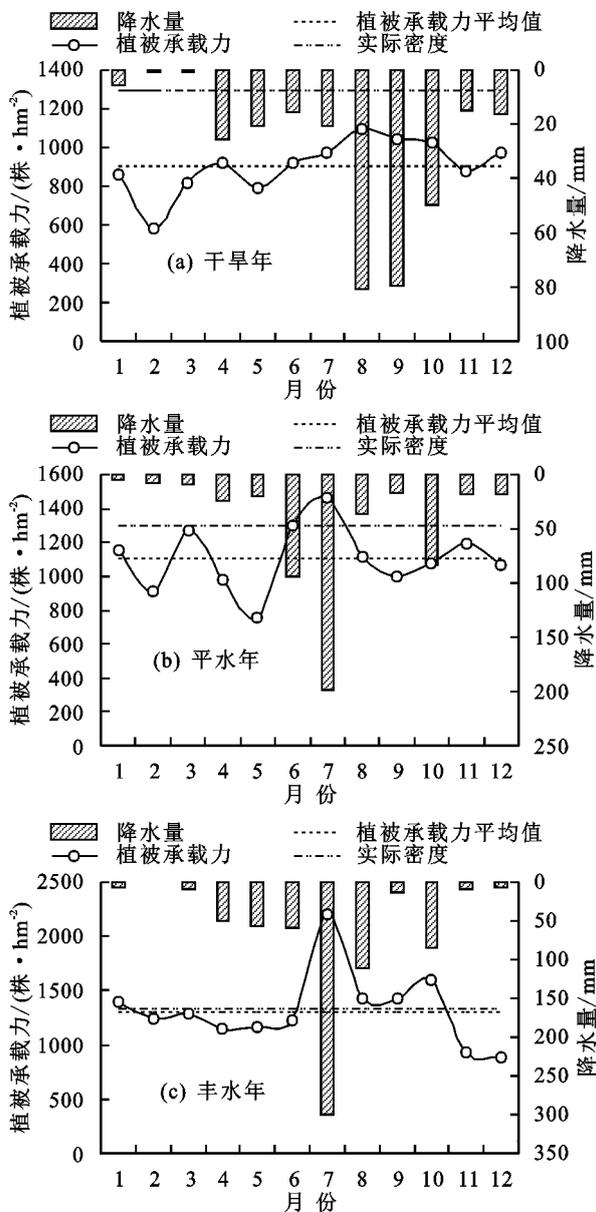


图 2 3种降水年型下刺槐人工林植被承载力动态变化

总体上,干旱年各月土壤水分植被承载力变化不大,均保持在 900 株/hm² 上下波动,最大值出现在 8 月,为 1 094 株/hm²。平水年年内平均植被承载力为 1 106 株/hm²,除 6,7 月的植被承载力高于林地实际密度外,其余各月均小于实际密度。年内土壤水分植被承载力最大值出现在 7 月,为 1 465 株/hm²。平水年土壤水分植被承载力明显高于干旱年,但仍无法保证年内多数月份的土壤水分植被承载力理论值高于实际造林密度。即使是该年雨季内,土壤水分也无

法有效满足该密度下刺槐林分的生长需求。丰水年年内植被承载力最大,年内平均植被承载力为 1 331 株/hm²,除 7—10 月植被承载力高于林地实际密度外,1—6 月植被承载力也基本接近刺槐人工林实际密度,表明 0—150 cm 范围内的土壤水分能够有效满足刺槐林分的蒸腾耗水需要,不会对深层土壤(>150 cm)水分造成影响。可见,只有在当地降水年型为丰水年时,降水对林地土壤水分的补给才可较好的满足该密度条件下刺槐林分的生长需求。

纵观 3 种降水年型下土壤水分植被承载力变化趋势可知,随着年降水量的增加,刺槐人工林土壤水分植被承载力呈现明显增加的趋势。同时雨季月份(7—9 月)土壤水分植被承载力明显高于非雨季月份,这是由研究区降水和土壤水分年内分布不均所致,因为研究区降水多集中在雨季^[15],使得该时段土壤储水量较高,进而土壤水分植被承载力较大。

3.3 土壤水分植被承载力模型的建立

3.3.1 土壤水分植被承载力及其影响因子的相关性分析 影响刺槐人工林土壤水分植被承载力的环境因子较多,为明确其主导因子,将月降水量、月土壤储水量、树干液流量、气温、风速等环境因子与植被承载力进行相关性分析(表 2)。相关性结果表明,刺槐林地植被承载力受月降水量和月土壤储水量的影响较大,其中又以月降水量对土壤水分植被承载力的影响最为明显,月降水量和月土壤储水量与土壤水分植被承载力均呈现出明显的正相关关系,相关系数分别为 0.740(月降水量),0.592(月土壤储水量)。其他环境因子对土壤水分植被承载力的影响不显著($P > 0.05$)。

表 2 刺槐人工林地土壤水分植被承载力与影响因子的相关性

影响因子	植被承载力	月降水量	土壤储水量	树干液流量	气温
月降水量	0.740**				
土壤储水量	0.592**	0.722**			
树干液流量	-0.317	0.585**	-0.132		
气温	0.241	0.159	0.214	0.302	
风速	-0.289	0.217	0.146	0.217	0.263

注: * 表示在 $P < 0.05$ 水平显著; ** 表示在 $P < 0.01$ 水平极显著; $n = 36$ 。

3.3.2 土壤水分植被承载力模型的建立 通过上述

分析,采用月降水量和月土壤储水量与土壤水分植被承载力进行相关拟合,分别建立包括幂函数、指数函数、多项式函数在内的多种形式的函数,并进行统计分析(表 3、表 4),结果表明以 $C = P^{1.11} + W^{1.42} - 209.91$ 、 $C = P^{-0.01} \cdot W^{1.50} - 705.33$ 和 $C = 1.61P + 12.41W - 837.21$ 这 3 种函数形式的拟合程度较好,其中又以 $C = P^{1.11} + W^{1.42} - 209.91$ 拟合程度最好,各参量所表达的物理意义也更为符合现实情况,能够较好地揭示土壤水分植被承载力随着月降水量和月土壤储水量变化而呈现出的变化规律。

研究区多年月平均降水量为 47.99 mm,多年月平均土壤储水量为 161.60 mm,通过承载力模型计算得到研究区 19 年树龄的刺槐人工林土壤水分植被承载力应为 1 224 株/hm²。因此,在研究区进行刺槐人工林植被建设时,应将当地刺槐人工林的实际造林密度(1 300 株/hm²)控制在 1 224 株/hm² 的土壤水分植被承载力范围内。

表 3 刺槐人工林土壤水分植被承载力模型

模型的建立	R^2	F	Sig.
$C = P^{1.11} + W^{1.42} - 209.91$	0.71	82.54	0.001
$C = P^{-0.01} \cdot W^{1.50} - 705.33$	0.66	64.61	0.002
$C = 1.61P + 12.41W - 837.21$	0.70	79.33	0.001

注: P 为月降水量; W 为月土壤储水量; $n = 36$ 。

表 4 不同降水年型下各水分植被承载力模型的拟合程度

降水年型	模型的建立	R^2	F
干旱年	$C = P^{1.11} + W^{1.42} - 209.91$	0.60	14.97
	$C = P^{-0.01} W^{1.50} - 705.33$	0.51	10.55
	$C = 1.61P + 12.41W - 837.21$	0.60	15.04
	$C = P^{1.11} + W^{1.42} - 209.91$	0.67	18.76
平水年	$C = P^{-0.01} W^{1.50} - 705.33$	0.52	11.36
	$C = 1.61P + 12.41W - 837.21$	0.65	16.36
	$C = P^{1.11} + W^{1.42} - 209.91$	0.74	27.81
	$C = P^{-0.003} W^{1.50} - 705.33$	0.62	16.04
丰水年	$C = 1.61P + 12.41W - 837.21$	0.72	25.57

注: P 为月降水量; W 为月土壤储水量; $n = 12$ 。

4 讨论

作为黄土高原地区刺槐人工林地土壤水分的唯一补给来源,降水量不仅对当地土壤水分的盈亏状态产生影响,还是确定黄土高原地区人工林合理种植密度、保证植物正常生长的关键因素^[24-26]。根据郭忠升^[27]的研究结果,土壤水分植被承载力是关于指示植物、时间和地理位置的函数,相同的地理位置下所栽植的指示植物种类或大小不同;相同指示植物所处的地理位置不同均会显著影响指示植物土壤水分植被承载力,需要根据不同的情景(包括降水量、指示植物的大小、种类以及地理位置等)确定适合的土壤水

分植被承载力。本文通过研究月降水量和月土壤储水量与植被承载力的动态关系,构建了适合于研究区的刺槐人工林土壤水分植被承载力模型。并以此计算出当地树龄为 19 年的刺槐人工林地 0—150 cm 土层范围内土壤水分植被承载力为 1 224 株/hm²,符合余新晓^[16]、武思宏等^[17]提出的黄土高原刺槐人工林适宜密度应为 1 200~2 000 株/hm² 的结论。目前,研究区刺槐人工林的实际密度为 1 300 株/hm²,稍大于本研究的计算结果,为在将刺槐人工林耗水深度控制在 0—150 cm 的同时,促进当地林分生产力达到最优水平,建议在今后营林造林过程中将林分密度限制在土壤水分植被承载力之内,从而减少林地深层水分消耗^[2],调整林地土壤水资源平衡,促进当地林业产业的合理发展^[28-29]。

本研究分别计算出 3 种降水年型下刺槐人工林地土壤水分植被承载力年内变化,有效避免了只研究单一年限、单一降水年型刺槐人工林土壤水分植被承载力时出现偶然性的可能,从而提高了土壤水分植被承载力模型的适用范围和适用精度。另外,在计算土壤水分植被承载力时直接使用了 0—150 cm 土层范围内土壤水分,而未选择植物根系吸收利用土层的土壤水分,能够较好地探求研究区刺槐人工林在当地现有降水和土壤水资源的条件下林分的生长是否会造成一定程度上的深层土壤水分消耗的问题,进而通过对当前刺槐人工林密度进行相应地调节来起到减少深层土壤水分消耗的目的。但本研究为计算方便,忽略了林下植被的蒸散作用,且在构建月降水量和月土壤储水量与土壤水分植被承载力关系时存在样本量不够大的情况。在今后将进一步扩大研究的时间尺度,深入分析刺槐林耗水机理、土壤水分亏缺机理和林水关系,为晋西黄土区林业生态工程建设和合理植被密度研究提供更为准确的理论基础和现实指导。

5 结论

(1) 3 种降水年型下,刺槐人工林耗水量、裸地土壤蒸发量和刺槐人工林地 0—150 cm 土壤水分蒸散发总量会随着年降水量增加而增加,刺槐耗水量与裸地土壤蒸发量之和约为林地蒸散发总量的 1.2 倍,偏高的林分密度增加了土壤深层水分的消耗。

(2) 月降水量和月土壤储水量是决定刺槐人工林土壤水分植被承载力的主导环境因子,且二者与土壤水分植被承载力均呈现出显著的正相关关系($P < 0.05$),相关系数分别为 0.740(月降水量),0.592(月土壤储水量)。

(3) 通过构建研究区的刺槐人工林土壤水分植被

承载力模型,计算出当地树龄为19年的刺槐人工林地0—150 cm土壤水分植被承载力为1 224株/hm²,稍小于研究区实际刺槐林分密度(1 300株/hm²),建议在今后营林造林过程中将林分密度限制在当地刺槐人工林土壤水分植被承载力之内。

参考文献:

- [1] 张千千.六盘山叠叠沟小流域土壤水分动态变化与植被生长的研究[D].河北保定:河北农业大学,2009.
- [2] 茹豪,张建军,李玉婷,等.晋西黄土高原水资源植被承载力分析及对策建议[J].环境科学研究,2015,28(6):923-929.
- [3] Shaltout K H, Sector N C, Reserve W A B, et al. Vegetation spatial heterogeneity in a hyper arid Biosphere Reserve area in north Africa[J].Acta Botanica Croatica, 2010,69(1):31-46.
- [4] 侯庆春,韩蕊莲,韩仕锋.黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探[J].中国水土保持,1999(5):11-14.
- [5] Li X R, Zhang Z S, Tan H J, et al. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazard areas of northern China: Relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert [J].Science China Life Sciences,2014,57(5):539-548.
- [6] Zeng C, Shao M A, Wang Q J, et al. Effects of land use on temporal-spatial variability of soil water and soil-water conservation [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, 2011,61(1):1-13.
- [7] Chen L D, Huang Z L, Gong J, et al. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China[J].Catena,2007,70(2):200-208.
- [8] 王延平,邵明安.陕北黄土丘陵沟壑区人工草地的土壤水分植被承载力[J].农业工程学报,2012,28(18):134-141.
- [9] 郭忠升,邵明安.半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J].生态学报,2003,23(8):1640-1647.
- [10] 郭忠升.黄土丘陵半干旱区土壤水分植被承载力研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2004.
- [11] 刘建立,王彦辉,于澎涛,等.六盘山叠叠沟小流域典型坡面土壤水分的植被承载力[J].植物生态学报,2009,33(6):1101-1111.
- [12] Cohen J E. Population growth and earth's human carrying capacity[J].Science,1995,269(5222):341-346.
- [13] Price D. Carrying capacity reconsidered[J].Population and Environment,1999,21(1):5-26.
- [14] 郭忠升,邵明安.土壤水分植被承载力数学模型的初步研究[J].水利学报,2004,35(10):95-99.
- [15] Xia Y Q, Shao M A. Soil water carrying capacity for vegetation: A hydrologic and biogeochemical process model solution[J].Ecological Modelling,2008,214(2):112-124.
- [16] 余新晓,张晓明,武思宏,等.黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J].山地学报,2006,24(1):19-26.
- [17] 武思宏,朱清科,余新晓,等.晋西黄土区主要造林树种合理林分密度计算与分析[J].水土保持研究,2008,14(1):83-86.
- [18] Granier A, Loustau D. Measuring and modelling the transpiration of a maritime pine canopy from sap-flow data[J].Agricultural and Forest Meteorology,1994,71(94):61-81.
- [19] 隋旭红,张建军,文万荣.晋西黄土区辽东栎、山杨树干液流比较研究[J].生态学报,2011,31(16):4791-4798.
- [20] 马李一,孙鹏森,马履一.油松、刺槐单木与林分水平耗水量的尺度转换[J].北京林业大学学报,2001,23(4):1-5.
- [21] 沈芳.黄土半干旱区刺槐林地实际蒸散量测算方法对比研究[D].北京:北京林业大学,2003.
- [22] 郭孟霞.晋西黄土区四倍体刺槐蒸散耗水规律研究[D].北京:北京林业大学,2007.
- [23] 王孟本,李洪建,柴宝峰.极端降水条件对林地水循环的影响[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,13(3):83-87,92.
- [24] 马文.黄土丘陵区典型人工林土壤水分补给与消耗特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [25] 潘竟虎,冯娅娅.甘肃省潜在生态承载力估算[J].生态学杂志,2017,36(3):800-808.
- [26] 刘青柏.辽西低山丘陵缓坡林地土壤水分动态及其植被承载力研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [27] 郭忠升.土壤水分植被承载力的理论与实践[M].北京:科学出版社,2014.
- [28] 王亚蕊.基于土壤水分植被承载力的叠叠沟小流域植被优化配置[D].北京:中国林业科学研究院,2016.
- [29] Liu B X, Shao M A. Modeling soil-water dynamics and soil-water carrying capacity for vegetation on the Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2015,159(3):176-184.