

晋西黄土区不同密度刺槐林地土壤水分补偿特征

王宁¹, 毕华兴^{1,2,3,4,5,6}, 孔凌霄¹, 侯贵荣¹, 崔艳红¹, 周巧稚¹, 常译方¹

(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)

摘要:为研究晋西黄土区不同密度刺槐人工林对土壤水分的影响,分别选取2 400株/hm²与1 300株/hm²刺槐人工林代表研究区高、低密度刺槐林分,以裸地为对照,分别利用Enviro-SMART土壤水分定位监测系统和翻斗式自记雨量计对0—150 cm深度范围内各土层体积含水量与林外降雨进行定位观测。结果表明:(1)从不同降水年份来看,在干旱年和平水年,低密度刺槐生长季平均土壤储水量高于高密度刺槐,在研究年份中,低密度刺槐多年平均土壤储水量比高密度刺槐多年平均土壤储水量高6.80 mm。(2)在土壤剖面垂直方向,干旱年、平水年高密度刺槐对0—30 cm土层土壤水分的消耗高于低密度刺槐,丰水年0—30 cm土层土壤水分消耗各刺槐林间差异不显著($P>0.05$)。(3)综合分析降雨入渗深度、入渗量及雨季土壤水分补偿度等指标,研究区天然降雨可对低密度刺槐林分生长所消耗的土壤水分进行有效补充,不会出现人们所担心的黄土高原在植被恢复过程中会造成水分的不足而导致新的生态退化。但考虑到高密度刺槐林对土壤水分的消耗,建议在研究区进行刺槐林植被建设过程中多考虑采用低密度刺槐林的配置方式。

关键词:晋西黄土区;刺槐;土壤水分补偿度;降雨

中图分类号:S725.6;S792.27

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)04-0255-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.036

Soil Water Compensation Characteristics of *Robinia pseudoacacia* Forestlands with Different Densities in the Loess Region of Western Shanxi Province

WANG Ning¹, Bi Huaxing^{1,2,3,4,5,6}, KONG Lingxiao¹, HOU Guirong¹,

CUI Yanhong¹, ZHOU Qiaozhi¹, CHANG Yifang¹

(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)

Abstract: In order to study the effects of *Robinia pseudoacacia* forestlands with different densities on soil moisture in the loess region of Western Shanxi Province, the *R. pseudoacacia* forestlands with densities of 2 400 per hacter and 1 300 per hacter were selected to represent the high and low density *R. pseudoacacia* forestlands in the study area respectively, and the bare land as a control. The soil water content in 0—150 cm range and precipitation outside the forest were carried out by using Enviro-SMART soil moisture positioning monitoring system and self-recording dump rain gauge. The results showed that: (1) In different precipitation years, the average soil water storage of low-density *R. pseudoacacia* forestland was higher than that of high-density *R. pseudoacacia* forestland in drought and normal years. In these years, the absolute value of annual average soil water storage of low-density *R. pseudoacacia* forestland was 6.80 mm higher than that of

收稿日期:2019-01-14

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)(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

high-density *R. pseudoacacia* forestland. (2) In the vertical direction of soil profile, the water consumption of 0—30 cm soil layer by high-density *R. pseudoacacia* forestland was higher than that of low-density *R. pseudoacacia* forestland in drought and normal years, and there was no significant difference in soil moisture consumption between these two kinds of *R. pseudoacacia* forestlands in wet years ($P > 0.05$). (3) Comprehensive analysis of rainfall infiltration depth, infiltration amount and compensation degree of soil moisture in rainy season, natural rainfall in the study area could effectively supplement the soil moisture consumed by low-density *R. pseudoacacia* stand growth, and there was no new ecological degradation caused by water shortage in the process of vegetation restoration in the Loess Plateau. However, considering the consumption of soil moisture by high density *R. pseudoacacia* forestland, it was suggested that low density *R. pseudoacacia* forestland should be popularized in vegetation construction in the study area.

Keywords: loess region of western Shanxi Province; *Robinia pseudoacacia*; compensation degree of soil water; rainfall

黄土高原的大部地处干旱半干旱地区,因土层深厚,地下水埋藏深,降水往往成为土壤水分的唯一补给源^[1]。土壤包气带中水分(简称土壤水)是植被生长和恢复最主要的限制因子,间接影响植被的时空分布格局^[2-4],从而改变整个生态系统的结构、组成和功能^[5],并在一定程度上影响小气候的变化^[6]。关于降雨对土壤水分动态影响方面的研究^[7-8],当前已取得一系列丰硕成果:刘丙霞^[9]采用中子测量法研究陕西神木六道沟小流域 4 种不同土地利用类型在不同降水年型下土壤水分动态规律,认为不同降水年型下土壤水分动态规律具有显著差异,建议降低植被群落密度或将撂荒地、农地与柠条地或苜蓿地进行混合斑块状配置;刘宏伟等^[1]在太湖西侧通过野外降雨试验研究地表和地下剖面土壤水分对降雨过程的响应模式,认为坡面土壤含水率受地形和局部微地形的影响较显著;李锋瑞等^[10]分析了陇东黄土旱塬不同降水年型作物土壤水分时空分异特征,结果表明冬小麦、玉米、马铃薯和谷子 4 种作物无论在干旱年还是丰雨年,0—200 cm 土层均可分为强变层、弱变层和相对稳定层;邱扬等^[11]采用 DCCA 排序研究黄土丘陵区小流域土壤水分的时空分异类型及与环境因子的关系表明,丰水年土壤水分垂直分布呈降低型、波动型和增长型 3 种类型,土壤水分季节变化表现为三峰型、四峰同步型与四峰滞后型 3 种类型;贾志清^[12]在研究晋西北黄土丘陵沟壑区典型灌草植被土壤水分动态规律时发现,垂直层次划分为速变层、活跃层和次活跃层,平水年活跃层较深,速变层较浅,而干旱年速变层较深,活跃层较浅。目前许多研究学者^[13-23]采用人工试验野外观测数值模拟等方法研究降雨对土壤水分入渗的影响,但通过高频率监测手段来分析不同密度刺槐林地土壤水分对天然降雨响应的研究仍较少,土壤水分补偿与恢复的衡量标准也尚未明确^[23],且降水年限往往局限于单一年限^[11-12]。

鉴于前人的研究成果,同时考虑到单一年限制

刺槐地对土壤水分的变化易受偶然性因素的干扰,因此本文选取晋西黄土区 2 400,1 300 株/hm² 刺槐人工林分别代表高、低密度刺槐,以裸地为对照,运用 Enviro-SMART 土壤水分监测系统监测深度 0—150 cm 范围内高(2 400 株/hm²)、低(1 300 株/hm²)密度刺槐土壤水分在 3 种降雨年型下土壤水分动态变化、剖面水分垂直变化、水分补偿特征等,为合理利用降水资源、缓解深层土壤水分亏缺及促进林业生态工程的良性发展提供理论依据和实际指导。

1 研究区概况

研究区位于山西吉县蔡家川流域(35°53′—36°21′N, 110°27′—111°07′E),是典型的黄土残塬沟壑区。流域上游为土石山区,植被为天然次生植被,流域中下游为黄土丘陵沟壑地貌,以天然次生林草植被和农田生态系统为主。多年平均降水量 575.9 mm,其中 4—10 月降水量约占全年的 80%,年蒸发量 1 729 mm,年平均气温 9.9 ℃。土壤类型主要为褐土,黄土母质,主要造林树种多为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*),灌木树种有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、荆条(*Vitex negundo*)等,草本植物以矮苔草(*Carex humilis* Leyss)为主。

2 研究方法

2.1 试验设计

根据晋西黄土区适宜刺槐林密度研究结果^[22],并结合大量实地勘察,在试验流域的同一坡面上,分别建立 2 块不同密度(1 300,2 400 株/hm²)刺槐林样地,以 1 块裸地样地作为对照,每块固定样地规格均为 20 m×20 m,各样地布设 1 个观测点,观测点位于样地中心位置,采用 Enviro-SMART 土壤水分监测系统对土壤水分进行实时定位监测。样地基本情况见表 1。

2.2 土壤水分数据监测

Enviro-SMART 土壤水分定位监测系统实行全天自动实时监测,观测深度为 0—150 cm,共分 7 个

观测层,分别为 0—10,10—20,20—40,40—70,70—100,100—120,120—150 cm。以 30 min/次的频率对 所观测样地的土壤水分进行监测。同时用土钻取土,采用烘干称重法对测定的含水量进行标定。

表 1 样地基本情况

编号	地类	林分密度/ (株·hm ⁻²)	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	郁闭度	树龄/a	平均 树高/m	平均 胸径/cm	枯落 物厚度/cm	林下植被 及盖度
1	裸地		1118	24	南偏东 34°						
2	人工刺槐林地	1300	1110	23	南偏东 34°	0.65	19	7.5	12.3	3.0	白草、铁杆蒿 0.5
3	人工刺槐林地	2400	1114	22	南偏东 34°	0.85	19	7.1	11.5	3.5	白草、铁杆蒿 0.4

2.3 降雨量的测定

降雨量数据通过设立于林外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 计数器实现降雨量和降雨历时的同步监测。

2.4 降雨入渗深度和入渗量的测定

分别根据降雨发生前 0.5 h 和降雨结束后 12 h 2 次测得的土壤剖面含水量分布情况进行比较分析,从而确定各样地土壤水分的入渗深度和入渗量。

2.5 数据处理

2.5.1 降水年份的选择 根据王孟本等^[17]的划分方

法,将降水量划 5 级判别标准,降水量距平均值百分率±15%范围内的为正常,定义为平水年。±15%~±40%为偏少或偏多,依次为干旱年和丰水年。—40%以下为极端干旱年,+40%以上为极端丰水年。研究区 2005—2017 年降水特征见表 2,研究区历史多年(1974—2017 年)平均降水量为 575.9 mm。考虑到单一年份刺槐林地土壤水分的变化易受偶然性因素的干扰,故本研究分别选取 2012 年、2016 年和 2017 年代表研究区不同降雨条件,其中 2012 年降水量为 409.2 mm,为干旱年;2016 年降水量为 548.3 mm,为平水年;2017 年降水量为 667.4 mm,为丰水年。

表 2 2005—2017 年降水特征

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
年降水量/mm	493.70	643.10	542.70	394.60	608.80	363.30	684.20	409.20	596.30	660.00	377.10	548.30	667.40
变化率/%	-14.27	11.67	-5.76	-31.48	5.71	-36.92	18.81	-28.95	3.54	14.60	-34.52	-4.79	15.89
降水年型	平水年	平水年	平水年	干旱年	平水年	干旱年	丰水年	干旱年	平水年	平水年	干旱年	平水年	丰水年

2.5.2 土壤储水量的计算 利用 Enviro-SMART 监测土层深度 0—150 cm 范围内各土层体积含水量,则各土层储水量计算公式为:

$$W_i = \theta_i \times D_i \tag{1}$$

总储水量计算公式为:

$$W = \sum_{i=1}^7 \theta_i \times D_i \tag{2}$$

式中:W_i为各土层储水量(mm);θ_i为第 i 个探头监测的土壤体积含水量(%);D_i为各测层厚度(mm);W 为 0—150 cm 土层的总储水量(mm)。

研究区植物生长季为 4—10 月。将 4,10 月土壤储水量分别作为生长季初期和末期土壤储水量,末期与初期的差值为生长季土壤储水量变化量。若生长季土壤储水量变化量数值为正,则表示生长季后该林地土壤水分盈余;若数值为负,则表示生长季林地耗水超过生长季降水量,林分生长消耗土壤贮水。

2.5.3 土壤水分亏缺与补偿计算 土壤水分高于 80%田间持水量时,植物不受水分胁迫,因此将 80%田间持水量视作黄土高原土壤正常含水量的下限,将其作为标准来衡量各林地土壤水分的亏缺状况^[24]。

土壤水分亏缺度的公式为:

$$DSW_i = \frac{D_i}{F_i} \times 100\% \tag{3}$$

$$D_i = F_i - W_i \tag{4}$$

式中:DSW_i为各测层土壤水分亏缺度(%);D_i为各测层土壤水分亏缺量(mm);F_i为各测层 80%田间持水量(mm);W_i为各测层土壤储水量(mm)。

土壤水分补偿度的公式为:

$$CSW_i = \frac{\Delta W_i}{D_{i6}} \times 100\% \tag{5}$$

$$\Delta W_i = W_{i9} - W_{i6} \tag{6}$$

$$D_{i6} = F_i - W_{i6} \tag{7}$$

式中:CSW_i为各测层土壤水分补偿度(%);ΔW_i为各测层雨季土壤储水变化量(mm);W_{i9}为各测层 9 月(雨季末)土壤储水量(mm);W_{i6}为各测层 6 月(雨季初)土壤储水量(mm);F_i为各测层 80%田间持水量(mm);D_{i6}为各测层 6 月(雨季初)土壤储水亏缺量(mm)。

分析降雨对土壤水分的补偿问题时,引入 CSW 这一指标来代表土壤水分补偿度,确切地量化天然降水对土壤水分的补给作用,以及补给后包气带土壤水分接近土壤正常含水量的程度,比单纯的研究降雨入渗补给量及降雨入渗补给系数具备更为明确的物理意义^[25]。

3 结果与分析

3.1 生长季刺槐林地土壤水分时间动态变化特征 由土壤储水量动态变化(图 1)可知,干旱年 4 月

降雨量偏低,林分生长开始,土壤储水量缓慢下降,不同密度刺槐林之间林地土壤含水量相差不大,低密度刺槐土壤储水量仅比高密度刺槐高 0.62 mm。5—6 月随气温升高,林分生长速率加快,土壤蒸发和林分蒸腾加剧对土壤水分的消耗,其中低密度刺槐在此期间土壤储水量保持相对稳定状态,但高密度刺槐土壤储水量持续下降,低密度刺槐土壤储水量比高密度刺槐高 8.58 mm。7—8 月,因同期降水量明显低于往年,强烈的林地耗水使刺槐林下土壤储水量降至全年最低,低密度刺槐土壤储水量比高密度刺槐土壤储水量高 6.37 mm。9—10 月随着降水量的增加和林分生长速率的减缓,土壤储水量呈上升趋势,低密度刺槐土壤储水量比高密度刺槐高 3.76 mm。总体来看,干旱年刺槐林分土壤储水量呈逐月下降趋势,低密度刺槐生长季平均土壤储水量比高密度刺槐高 5.25 mm。

平水年刺槐林土壤储水量呈“双峰”变化,且第 2 个峰值明显高于第 1 个峰值。4—6 月刺槐林土壤储水量先增后减,高密度刺槐土壤储水量变化幅度明显高于低密度刺槐,低密度刺槐土壤储水量比高密度刺槐高 3.1 mm。7—8 月随着降水量的增加,土壤水分得到一定程度的恢复,但因林分耗水速率的加快,土壤水分逐步处于供耗平衡状态,后因林分耗水的进一步增加致使储水量下降。其中高、低密度刺槐林土壤储水量变化差异体现在二者储水量峰值出现的时间,低密度刺槐(8 月)稍晚于高密度刺槐(7 月)。此阶段低密度刺槐土壤储水量比高密度刺槐高 8.31 mm。9—10 月随刺槐林分生长速率的放缓,林分土壤储水量虽呈下降趋势,但降幅较缓,低密度刺槐土壤储水量比高密度刺槐高 4.14 mm。而裸地储水量于平水年 6—8 月出现大幅增加,但因对水分固持能力差,大量水分被蒸发散失,9—10 月土壤储水量下降较快。平水年低密度刺槐生长季平均土壤储水量比高密度刺槐高 4.89 mm。同时干旱年、平水年刺槐林分生长季末期土壤储水量均低于生长季初期,属土壤水分消耗状态。2 种年型的生长季平均土壤储水量由高到低均为裸地>低密度刺槐>高密度刺槐。

丰水年储水量呈“单峰”变化,其中 4—5 月因同期降水量偏小,刺槐林间土壤储水量差值较小。6—8 月随降水量的剧烈增加,储水量差值逐渐增大,刺槐林分土壤储水量表现为先急速上升后缓慢下降,高密度刺槐土壤储水量比低密度刺槐高 6.06 mm。9—10 月因林分生长速率放缓,刺槐林分土壤储水量再次缓慢上升,高密度刺槐土壤储水量比低密度刺槐高 6.17 mm。丰水年生长季平均储水量由高到低依次为裸地>高密度刺槐>低密度刺槐。同时丰水年各样地土壤储水量均

高于生长季初期,属土壤水分盈余状态。综合分析高、低密度刺槐林储水量变化可知,低密度刺槐林多年平均土壤储水量比高密度刺槐林高 6.80 mm。

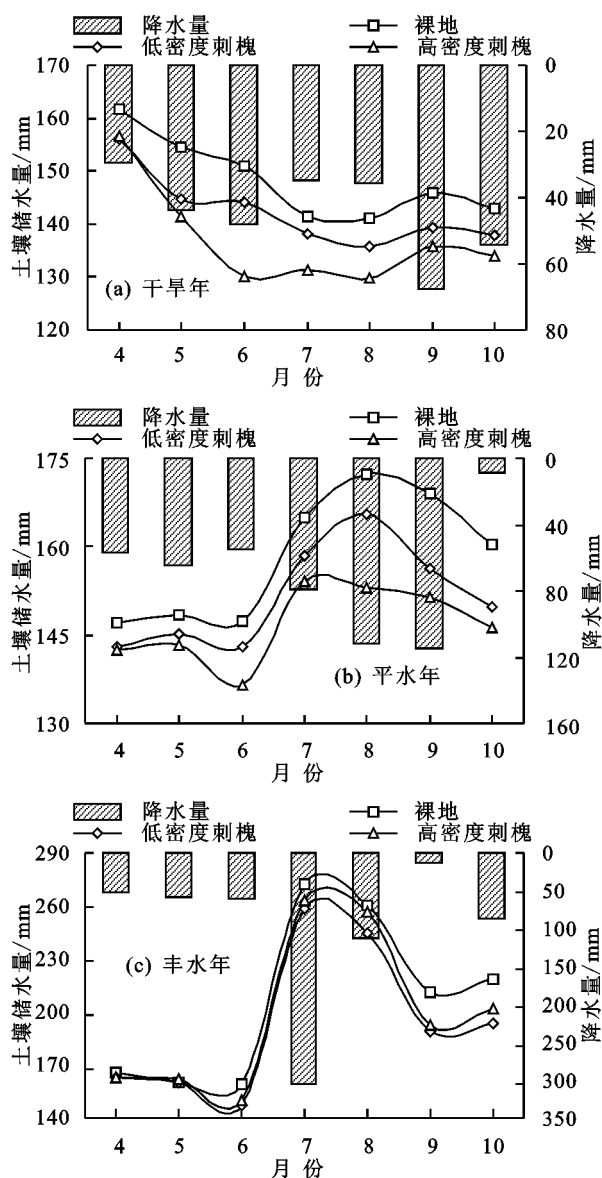


图 1 生长季降水量与土壤储水量动态变化

3.2 不同密度刺槐林土壤水分垂直变化特征

土壤水分垂直变化主要受降雨、土壤蒸发、植被耗水等相互作用影响^[21-22]。由土壤平均含水量在土壤垂直剖面上的变化曲线(图 2)可以看出,干旱年高、低密度刺槐林土壤水分剖面变化趋势基本一致。0—20 cm 土层范围内,刺槐林土壤含水量随土层深度增加而升高,其中低密度刺槐林测层平均土壤含水量比高密度刺槐林高 1.54%;20—40 cm 刺槐林土壤含水量随土层深度增加而下降,低密度刺槐林测层平均土壤含水量比高密度刺槐林高 0.66%;40—100 cm 刺槐林土壤含水量随土层深度增加而增大,低密度刺槐林测层平均土壤含水量比高密度刺槐林高 0.72%,且二者土壤含水量最大值均出现在土层深度 100 cm 处;100—150 cm 刺槐林土壤含水量随土层

深度加深而轻微下降,且低密度刺槐林测层平均土壤含水量比高密度刺槐林高 0.10%。平水年刺槐林土壤含水量随土层深度下降其变化趋势与干旱年相同,但刺槐林间含水量差值却明显高于干旱年。平水年 0—20 cm 低密度刺槐林测层平均土壤含水量比高密度刺槐林高 3.54%,20—120 cm 低密度刺槐土壤含水量高于高密度刺槐的差值随土层深度增加呈先增后减又增的变化趋势,变化范围处于 0.93%~1.14%,120—150 cm 样地间土壤含水量趋于一致。丰水年高、低密度刺槐林表层(0—40 cm)土壤含水量差异较小,但 40—120 cm 低密度刺槐林测层平均土壤含水量比高密度刺槐林低 1.77%,120—150 cm 各刺槐林地土壤含水量保持稳定。

裸地 0—20 cm 土层范围土壤含水量随土层深度的增加而减少,年平均土壤含水量为 15.99%。干旱年土层深度 20—40 cm,平水年和丰水年土层深度 20—70 cm 范围内裸地土壤含水量均随土层深度增加而增大,年平均土壤含水量为 17.67%。该深度以下土壤含水量随土层深度加深而减少,年平均土壤含水量 16.35%。即裸地因缺乏林分结构致使土壤表层

0—20 cm 范围内水分蒸发量较大,土壤含水量明显偏低,20—150 cm 土壤含水量呈现明显的先增后减的变化趋势,但水分状况整体优于刺槐林地。

比较含水量垂直变化特征,发现高密度刺槐在干旱年或平水年,即降水量偏少或中等的年份,0—30 cm 土层水分消耗明显高于低密度刺槐,这是由于刺槐林根系主要分布在土壤垂直剖面 0—60 cm 范围,最大有效根长密度距地表 0—30 cm^[18]。因为低密度刺槐分布在土壤表层的有效根系明显少于高密度刺槐林,故对表层土壤水分消耗低于高密度刺槐。但丰水年二者土壤水分消耗差异不显著($P>0.05$),可见,林分密度对表层土壤水分消耗的差异会随年降水量的增加而减小。

比较刺槐林与裸地土壤含水量,在 0—30,90—120 cm 土层范围内刺槐林地平均土壤含水量高于裸地,30—90 cm 范围内裸地平均土壤含水量高于刺槐林地,120—150 cm 含水量保持一致。其中 90—120 cm 刺槐林土壤水分偏高,可能与刺槐根系活动改善深层土壤孔隙结构有关,增加了降雨的下渗使土壤含水量略高于裸地状态。

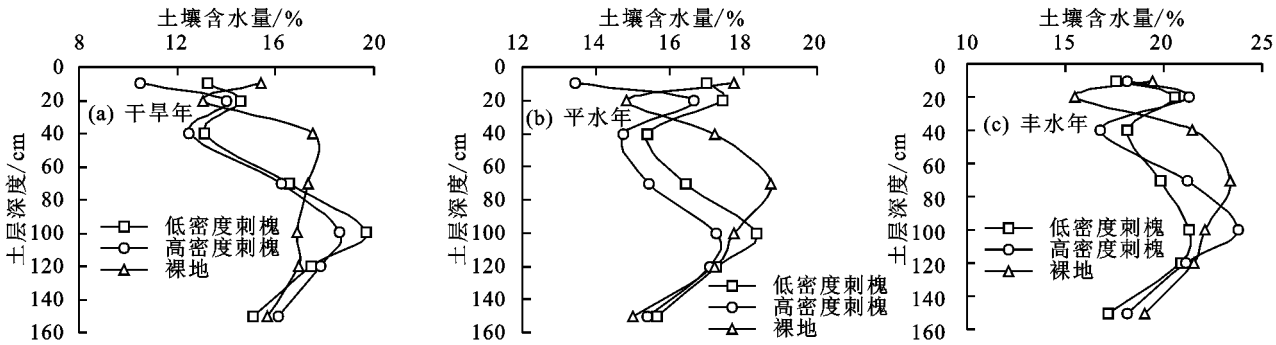


图 2 土壤含水量剖面分布特征

3.3 不同降雨及不同林分密度条件下刺槐林地土壤水分补偿特征

3.3.1 场降雨下入渗深度和入渗量 根据我国气象部门对降雨强度的划分标准^[21](表 3),于 2012 年、2016 年、2017 年内分别选择 3~4 场降雨,强度依次为小雨、中雨、大雨、暴雨(2012 年全年未出现满足暴雨要求的单场降雨),对比高、低密度刺槐在单场降雨下的土壤水分入渗深度和入渗量。所选日期前后 3 日均无降雨情况出现,且不同年型同种降雨强度下降雨量尽可能相等。

表 3 降雨强度划分标准

降雨类型	降雨量划分
小雨	12 h 内雨量<5.0 mm 或 24 h 内雨量<10.0 mm
中雨	12 h 内雨量为 5.0~14.9 mm 或 24 h 内雨量为 10.0~24.9 mm
大雨	12 h 内雨量为 15.0~29.9 mm 或 24 h 内雨量为 25.0~49.9 mm
暴雨	12 h 内雨量≥30.0 mm 或 24 h 内雨量≥50.0 mm

雨前后的变化可知,小雨条件下刺槐林入渗深度为 10 cm,低、高密度刺槐林入渗量分别为 1.55,0.31 mm。在中雨条件下,刺槐林入渗深度为 20 cm,低、高密度刺槐林入渗量分别为 5.06,1.92 mm。大雨条件下低密度刺槐土壤水分入渗深度为 40 cm,入渗量为 16.55 mm;高密度刺槐土壤水分入渗深度为 20 cm,入渗量为 15.80 mm。即干旱年低密度刺槐的入渗量比高密度刺槐更具有明显优势,且二者入渗深度的差异随降雨强度的增加而加大。平水年小雨条件下(图 4),刺槐林入渗深度均为 10 cm,低、高密度刺槐入渗量分别为 3.65,1.91 mm。中雨条件下,低密度刺槐入渗深度为 30 cm,入渗量为 7.13 mm,而高密度刺槐入渗深度为 20 cm,入渗量为 5.39 mm。大雨条件下低、高密度刺槐入渗深度均为 40 cm,入渗量分别为 21.85,23.04 mm。当发生暴雨时,低、高密度刺槐入渗深度均为 70 cm,入渗量分别为 31.64,32.31 mm。故平水年降雨强度为小雨或中雨时,低

由图 3 干旱年不同密度刺槐林土壤含水量在降

密度刺槐林内土壤水分入渗深度和入渗量均大于高密度刺槐林,而降雨强度为大雨或暴雨时高密度刺槐林土壤水分入渗量高于低密度刺槐林地。

丰水年条件下(图 5)刺槐林在小雨发生时入渗深度均为 10 cm,低、高密度刺槐入渗量分别为 4.56,3.74 mm。当为中雨时,入渗深度均为 40 cm,低、高密度刺槐入渗量分别为 7.91,6.43 mm。大雨条件下,低密度刺槐入渗深度为 70 cm,入渗量为 23.18 mm;高密度刺槐入渗深度为 40 cm,入渗量为 25.50 mm。暴雨条件下二者入渗深度均达到了 70 cm,入渗量分别为 30.66,30.73 mm。综合分析不同降雨强度下高、低密度刺槐土壤水分动态变化可知,当降雨强度较小(即小雨或中雨)时,

低密度刺槐的入渗深度和入渗量均大于高密度刺槐。当降雨强度较大(即大雨或暴雨)时,高、低密度刺槐的水分入渗量随降雨年型的不同而产生差异,具体表现为干旱年低密度刺槐入渗量高于高密度刺槐入渗量,平水年和丰水年高密度刺槐土壤水分入渗量高于低密度刺槐。入渗深度二者虽有差异,但差异不显著($P>0.05$)。同时发现即使处于同一降雨强度下,刺槐林土壤水分的入渗量和入渗深度均随年降水量的增加而增加,这主要与土壤水分对降水量的响应机制存在一定的关系,还需要进一步的分析研究。但高、低密度刺槐林土壤水分入渗深度和入渗量差距的绝对值会随降雨强度的增大逐渐减小。

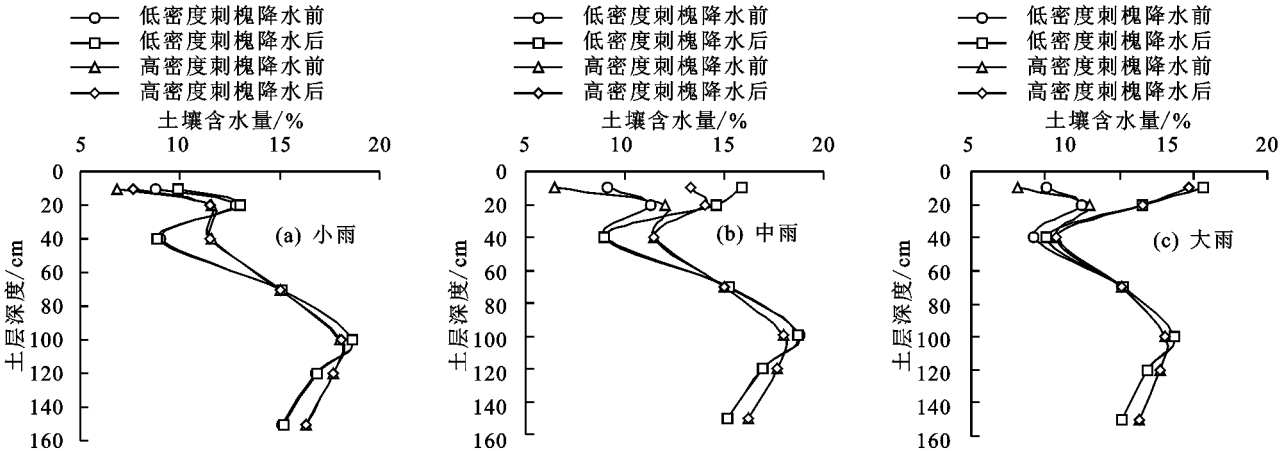


图 3 干旱年不同降雨强度下刺槐林土壤水分的动态特征

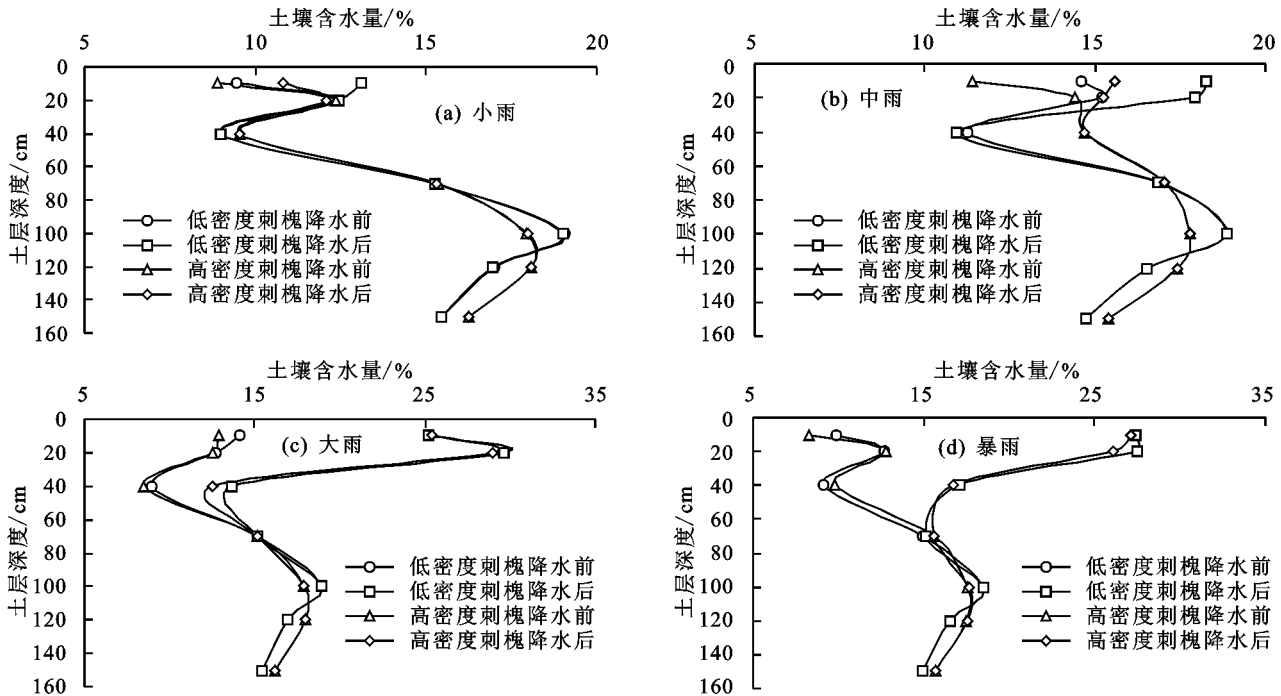


图 4 平水年不同降雨强度下刺槐林土壤水分的动态特征

3.3.2 土壤水分补偿特征 由雨季土壤水分补给度(图 6)可知,干旱年刺槐林土壤水分补给深度为 0~30 cm,补给度均值分别为 15.7%(低密度刺槐)和 8.6%(高密度刺槐)。40~150 cm 为负水分补偿,补

偿度均值分别为 -31.6%(低密度刺槐)和 -38.8%(高密度刺槐)。即干旱年雨季后,降水无法对因刺槐生长所消耗的土壤水分进行有效的补充,迫使刺槐根系汲取深层土壤水分,其影响深度甚至达到 150 cm

土层深度。平水年雨季土壤水分补给度明显优于干旱年,刺槐林土壤水分仅深度 40~100 cm 的补给度为负,其余各层均保持在 10% 左右。其中低密度刺槐补给度明显高于高密度刺槐,二者最小补偿度均出现于 70 cm 处,分别为 -17.3% (低密度刺槐) 和 -44.2% (高密度刺槐),整体补给度曲线呈现“U”形变化,对深层土壤水分起到一定程度的补充作用。丰水年 0—40 cm 低密度刺槐林平均土壤水分补给度比高密度刺槐高 5.73%,40—150 cm 高密度刺槐补给

度的增长幅度高于低密度刺槐,其中二者补给度峰值分别为高密度刺槐 172.4%(100 cm)、低密度刺槐 134.8%(120 cm)。峰值后随土层深度增加刺槐林分补给度虽有不同程度回落,但均高于 82.7%,且经方差分析,二者补偿度虽存在差异,但差异不显著($P>0.05$)。总体上低密度刺槐雨季土壤水分补给度优于高密度刺槐,且降水可在雨季后对因林分生长消耗的土壤水分进行有效的补充,防止黄土高原植被恢复过程中造成新的生态退化。

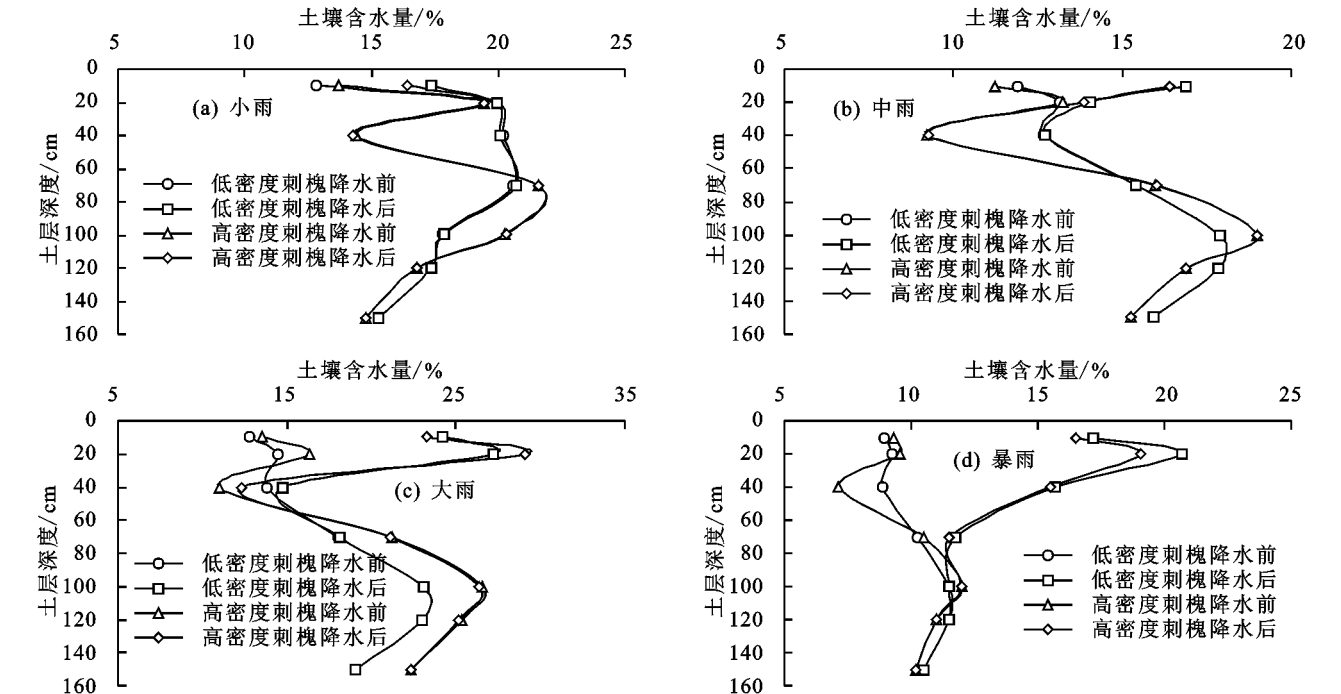


图 5 丰水年不同降雨强度下刺槐林土壤水分的动态特征

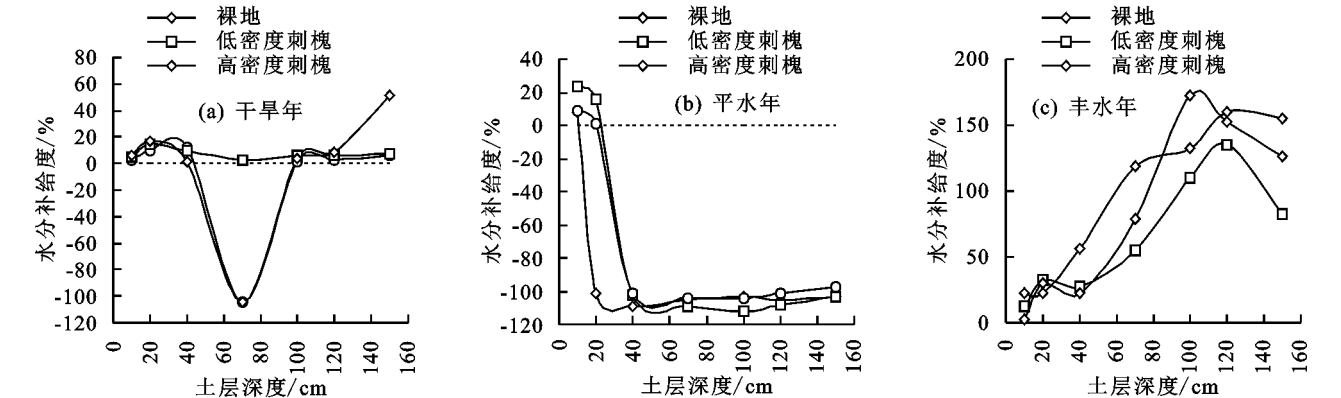


图 6 不同降雨条件下水分补给度

4 讨论

本研究通过对土壤水分的连续定位监测,研究了不同降雨条件下高、低密度刺槐人工林土壤水分补偿特性,为定量分析土壤水分动态变化及其对降雨的响应机制提供了可靠的数据基础。同时采用土壤水分亏缺和补偿程度来定量描述土壤水分的补偿和恢复,物理意义更加明确,能更好地反映降雨对土壤水分的补偿作用。根据不同密度刺槐林对土壤水分的消耗

差异,结合研究区水资源现状,建议在满足林业生产需要的同时,推广经营低密度刺槐林配置,以改善晋西黄土区土壤水分现状。本研究虽排除了单一降雨年份土壤水分对降雨的响应受到偶然因素干扰的可能性,但因研究时间有限,非研究年份降雨对本研究结论的影响仍未充分考虑。同时本文虽采用 2 400, 1 300 株/hm² 分别代表研究区高密度和低密度的刺槐林,但对于向研究区提供一种更为全面的基于水平

衡理论的刺槐林密度控制与管理技术而言,密度梯度仍间隔较大。今后将进一步扩大研究的时间尺度,设置更多的刺槐林密度梯度进行比较,深入分析刺槐林耗水机理、土壤水分亏缺机理和林水关系并建立模型,计算出符合当地土壤水分供耗平衡的刺槐林适宜密度,为晋西黄土区林业生态工程建设提供更合理的理论基础和实际参考。

5 结论

(1)干旱年、平水年低密度刺槐生长季平均土壤储水量高于高密度刺槐,丰水年低密度刺槐土壤生长季平均储水量低于高密度刺槐,低密度刺槐林多年平均土壤储水量比高密度刺槐林多年平均土壤储水量高 6.80 mm。

(2)干旱年、平水年高密度刺槐对 0—30 cm 土层土壤水分的消耗明显高于低密度刺槐,丰水年二者耗水量差异不显著。

(3)综合分析降雨入渗深度、入渗量及雨季土壤水分补偿度等指标,研究区天然降雨可对低密度刺槐林分生长所消耗的土壤水分进行有效补充,不会出现人们担心的黄土高原在植被恢复过程中会造成水分的不足而导致新的生态退化。

参考文献:

- [1] 刘宏伟,余钟波,崔广柏.湿润地区土壤水分对降雨的响应模式研究[J].水利学报,2009,40(7):822-829.
- [2] 黄肖勇,李生宝.半干旱黄土丘陵区土壤水分动态变化研究综述[J].农业科学研究,2009,30(3):69-72.
- [3] 邹文秀,韩晓增,王守宇,等.降水年型对黑土区土壤水分动态变化的影响[J].水土保持学报,2009,23(5):138-142.
- [4] Xia Y Q, Shao M A. Evaluation of soil water-carrying capacity for vegetation: The concept and the model[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Plant Soil Science,2009,59(4): 342-348.
- [5] Gao X D, Wu P T, Zhao X N, et al. Estimating spatial mean soil water contents of sloping jujube orchards using temporal stability[J]. Agricultural Water Management,2011,102(1):66-73..
- [6] Jia Y H, Shao M A, Jia X X. Spatial pattern of soil moisture and its temporal stability within profiles on a loessial slope in northwestern China[J]. Journal of Hydrology,2013,495:150-161.
- [7] Pausas J G, Austin M P. Patterns of plant species richness in relation to different environments: An appraisal[J]. Journal of Vegetation Science,2001,12(2):153-166.
- [8] 李笑吟.晋西黄土区土壤水分时空变化规律研究[D].北京:北京林业大学,2006.
- [9] 刘丙霞.黄土区典型灌草植被土壤水分时空分布及其植被承载力研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2015.
- [10] 李锋瑞,赵松岭.陇东黄土旱塬不同降水年型作物土壤水分时空分异特征分析[J].兰州大学学报,1996,32(2):99-107.
- [11] 邱扬,傅伯杰,王军,等.黄土丘陵小流域土壤水分时空分异与环境关系的数量分析[J].生态学报,1999,20(5):741-747.
- [12] 贾志清.晋西北黄土丘陵沟壑区典型灌草植被土壤水分动态变化规律研究[J].水土保持通报,2006,26(1):10-15.
- [13] 张北赢,徐学选,刘文兆,等.黄土丘陵沟壑区不同降水年型下土壤水分动态[J].应用生态学报,2008,19(6):1234-1240.
- [14] 李毅,邵明安.间歇降雨和多场次降雨条件下黄土坡面土壤水分入渗特性[J].应用生态学报,2008,19(7):1511-1516.
- [15] 傅斌,王玉宽,朱波,等.紫色土坡耕地降雨入渗试验研究[J].农业工程学报,2008,24(7):39-43.
- [16] Huo R, Shao M A. Impact of gully on soil moisture of shrubland in wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau[J]. Pedosphere,2008,18(5):674-680.
- [17] 王孟本,李洪建,柴宝峰.极端降水条件对林地水分循环的影响[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(3):83-87.
- [18] 王军,傅伯杰.黄土丘陵小流域土地利用结构对土壤水分时空分布的影响[J].地理学报,2000,55(1):84-91.
- [19] 曹建生,张万军,刘昌明,等.石子和秸秆覆盖条件下降雨水量转化特征试验研究[J].水利学报,2007,38(3):378-382.
- [20] 张秋英,李发东,欧国强,等.土壤水对降水和地表覆盖的响应[J].北京林业大学学报,2005,27(5):37-41.
- [21] 常译方,毕华兴,许华森,等.晋西黄土区不同密度刺槐林对土壤水分的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):227-232.
- [22] 鲍彪,毕华兴,云雷,等.晋西黄土区刺槐林地土壤水分对降雨的响应[J].北京林业大学学报,2012,34(2):84-89.
- [23] Ridolfi-Iturbe I. Eco-hydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics[J]. Water Resource Research,2000,36(1):1-9.
- [24] 陈洪松,邵明安.黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J].水科学进展,2003,14(4):513-520.
- [25] 王进鑫,黄宝龙,罗伟祥.黄土高原人工林地水分亏缺的补偿与恢复特征[J].生态学报,2004,24(11):2395-2401.