



陕北刺槐林木生长及林下植被与土壤水分 对种植密度的响应特征

吴多洋¹,焦菊英^{1,2,3*},于卫洁²,徐海燕¹,陈一先³

(1 西北农林科技大学 林学院,陕西杨陵 712100;2 西北农林科技大学 水土保持研究所,陕西杨陵 712100;3 中国科学院 水利部
水土保持研究所,陕西杨陵 712100)

摘要:以陕西省安塞县 2000 年左右退耕栽植的 5 种不同密度($830\sim3330 \text{ 株}/\text{hm}^2$)刺槐林地为研究对象,分析不同栽植密度对刺槐林木生长、林下植被及土壤水分的影响,为黄土高原丘陵沟壑区刺槐人工林合理栽植密度的确定以及可持续经营提供理论依据。结果表明:(1)阳坡中不同密度间刺槐林木的胸径、树高、冠幅均差异显著;阴坡中 2 500 株/ hm^2 的刺槐林木平均胸径、树高与两个低密度林的差异显著,且平均冠幅与 1 670 株/ hm^2 差异显著,与 2 000 株/ hm^2 差异不显著。(2)当栽植密度为 1 670 株/ hm^2 时,刺槐林地水分含量相对较高,林下植被平均盖度及物种多样性也较高。(3)各栽植密度刺槐林地 0~500 cm 土壤含水量均低于该地区土壤稳定湿度(12%)。(4)阳坡中 3 330 株/ hm^2 的林地 0~500 cm 土层含水量仅为 4.5%,土壤干旱化严重,而 830 株/ hm^2 的刺槐林地土壤水分 7.8%;阴坡中栽植密度为 1 670~2 000 株/ hm^2 的刺槐林地土壤含水量较高,为 7.5%~8.2%。研究表明,在陕北黄土高原丘陵沟壑区,刺槐初始造林密度不宜超过 1 670 株/ hm^2 (株行距 2 m×3 m),在进入刺槐生长高峰期后,应采取间伐管理以调整林分密度,使其维持刺槐人工林林地的稳定性与可持续性。

关键词:刺槐生长;响应特征;林下植被;土壤水分;黄土丘陵沟壑区

中图分类号:Q948.1;S718.5 文献标志码:A

Response Characteristics of Locust Growth, Understory Vegetation and Soil Moisture on Planting Density in Northern Shaanxi

WU Duoyang¹, JIAO Juying^{1,2,3*}, YU Weijie², XU Haiyan¹, CHEN Yixian³

(1 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 Institute of Soil and Water Conservasion, CAS and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the impact of planting density on the locust growth, understory vegetation and soil moisture on the Hilly-gullied Loess Plateau in northern Shaanxi, we observed and analyzed the locust woodland planted around 2 000 with five different planting densities. The results show that: (1) in sunny aspect, the average DBH, tree height and crown between different densities were significantly different ($P < 0.05$). In shady aspect the average DBH and tree height in the density of 2 500 plants/ hm^2 were significantly different from the another two lower densities. The average crown was significantly different from 1 670 plants/ hm^2 while insignificantly from 2 000 plants/ hm^2 ($P > 0.05$). (2) Woodland soil moisture, cover

收稿日期:2016-11-29;修改稿收到日期:2017-01-19

基金项目:国家自然科学基金(41371280);水利部公益性行业专项(201501045)

作者简介:吴多洋(1993—),男,硕士研究生,主要从事流域生态学研究。E-mail:979463769@qq.com

*通信作者:焦菊英,研究员,博士生导师,主要从事流域侵蚀产沙、土壤侵蚀与植被关系及水土保持效益评价研究。E-mail:jyjiao@ms.

iswc.ac.cn

of understory vegetation and species diversity were relatively higher under the density of 1 670 plants/hm². (3) Soil moisture in 0~500 cm depth of locust woodland with each density was lower than that of stable soil moisture (12%) in the study area. (4) In sunny aspect, soil moisture in 0~500 cm depth with density of 3 330 plants/hm² was only 4.5%, while the density of 830 plants/hm² reached 7.8%, and the soil moisture with density of 1 670 plants/hm² and 2 000 plants/hm² was relatively higher in shady aspect, which was 7.5%~8.2%. The study suggests that the initial planting density of locust should not be more than 1 670 plants/hm² (spacing of 2 m×3 m) in the hilly-gullied loess area and thinning management should be taken to adjust the stand density after entering the peak growth period in order to maintain the stability and sustainability of locust plantation.

Key words: locust growth; response characteristics; understory vegetation; soil moisture; hilly-gullied Loess Plateau

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)是一种喜光、中型的阔叶先锋树种,具有一定固氮作用^[1],原生长于北美东南部,后被陆续引入北美其它地区,以及南美温带、非洲、亚洲温带、欧洲、澳大利亚和新西兰^[2]。据调查,刺槐是自桉树(*Eucalyptus robusta*)和杨树(*Populus L.*)之后在全世界最广泛种植的树种之一^[3],因其木材性质优良,能够适应不同的气候环境,且耐干旱贫瘠,因而在全世界被广泛种植^[4]。在黄土高原地区,自20世纪50年代引入以来,刺槐作为重要的水土保持树种被大量栽植。刺槐不仅能够提供木材,带动当地蜂产业的发展,具有一定经济价值,同时在改善这一地区的生态环境、防治水土流失、调节水文状况等方面发挥着重要作用。然而,在一些地区营林实践中,刺槐通常由于造林密度过大,或是未能做到适地适树等原因,导致林分衰败低产,形成“小老头”树,且其生长消耗大量水分,致使深层土壤干燥化严重,形成不同深度土壤干层^[5-6],这不仅严重影响刺槐林木的生长,同时也存在着制约当地生态植被恢复的风险^[7]。因此,在水分限制且水土流失严重的黄土丘陵沟壑区,使人工林在不同时期保持在合理的密度范围,对发挥人工林水土保持功能意义重大^[8-9]。

目前,在黄土高原地区,围绕刺槐密度的研究涉及多方面,主要包括不同密度刺槐林的水土保持功能^[10]、不同密度林地的蒸腾特征^[11]与土壤水分动态^[12-13]、林分密度与地上生物量^[14]和林下植被^[15]关系及合理密度探讨^[16-18]等方面。而有关上层林木生长、林下植被及林地土壤水分对刺槐栽植密度响应方面的系统研究相对较少,而这对于刺槐合理密度确定及刺槐人工林生态功能的发挥十分重要。在陕北黄土丘陵沟壑区,在大规模实施退耕还林工程后,刺槐人工林的栽植面积大幅度增加,已成为黄土丘陵沟壑区主要的人工植被。然而,退耕还林15

年以来,不同栽植密度下刺槐的生长状况如何?林下植被与土壤水分环境是否能维持刺槐林的健康发育与稳定性?刺槐的合理栽植密度又该如何确定?围绕这些问题,本研究以陕北安塞县退耕后栽植的不同密度15年生刺槐林地为研究对象,通过对林木生长状况、林下植被及林地土壤水分的调查,分析不同种植密度下林木生长状况、林下植被及林地土壤水分等方面的差异,旨在阐明不同种植密度对刺槐林木生长及其林下植被与土壤水分的影响,以期为该地区刺槐人工林可持续经营及合理种植密度的确定提供一定参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究在陕北黄土丘陵沟壑区的安塞县进行。安塞县属于典型的森林草原带,地形复杂,沟壑纵横,海拔在997~1 731 m之间,为典型的梁峁状沟壑区。该地区主要受暖温带半干旱大陆性气候的影响,年均气温8.8℃,年降雨量500 mm左右,其中6~9月雨季降水占全年降水量的72.9%^[19]。该县自然植被几已全遭破坏,人工林以刺槐、小叶杨(*Populus simonii*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主,撂荒坡面主要为铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、茭蒿(*Artemisia giraldii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)和白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等处于不同演替阶段的草本植物群落。土壤类型属于黄绵土,其中粉粒占到64%以上,土质疏松,抗蚀抗冲性差,水土流失严重^[20]。

刺槐作为重要的水土保持树种,自20世纪50年代以来在黄土高原地区被广泛栽植,成为黄土高原人工林面积最大的树种之一,在加快黄土高原地区植被恢复、改善生态环境、防止水土流失方面起到

十分重要的作用。自1999年退耕还林工程实施以来,黄土高原地区刺槐造林面积累计已达数百万亩。根据安塞县退耕办的历年造林数据,截止2013年底,安塞全县退耕还林中刺槐的造林面积累计达到2.67万hm²,刺槐是安塞县人工林中分布最广、种植面积最大的乔木树种。

1.2 样地选取与植被调查

以安塞县2000年左右退耕栽植的不同密度刺槐林地为研究对象,样地选于该县的纸坊沟、张家河、三王沟小流域,每个流域按照阴坡阳坡各选5组样地,共计30个样地。样地间土壤质地无大的差异,造林方式均为鱼鳞坑造林。造林密度分为5个

处理:株行距2m×1.5m即密度I(3330株/hm²),株行距2m×2m即密度II(2500株/hm²),株行距2m×2.5m即密度III(2000株/hm²),株行距2m×3m即密度IV(1670株/hm²),株行距3m×4m即密度V(830株/hm²)。样地大小设置为10m×10m,每个样地林下设置3个1m×1m样方调查林下植被。样地基本情况见表1。调查内容包括乔木的树高、胸径、林木冠幅(东—西和南—北向的平均值),以及林下物种的盖度、高度、频度等。

1.3 土样水分测定

采用土钻法测定土壤水分状况,采样深度为0~500cm,其中0~100cm间隔10cm采样,100~

表1 调查样地基本情况
Table 1 The basic conditions of sampling plots

种植密度 Planting density (plants·hm ⁻²)	坡向 Aspect	坡度 Slope/°	海拔 Altitude/m	郁闭度 Canopy density/%	林下植被盖度 Cover of understory/%	枯落层盖度 Cover of litter/%
830	阳 Sunny	27	1 292	50	5	50
	阳 Sunny	28	1 314	50	7	75
	阳 Sunny	19	1 375	70	32	98
	阳 Sunny	22	1 446	55	32	60
1 670	阳 Sunny	28	1 328	45	31	30
	阳 Sunny	22	1 292	50	6	40
	阳 Sunny	25	1 374	55	28	15
	阳 Sunny	27	1 315	50	12	40
	阳 Sunny	22	1 348	50	6	45
	阴 Shady	26	1 298	45	50	40
	阴 Shady	31	1 364	40	3	25
	阴 Shady	27	1 292	55	31	20
	阴 Shady	25	1 314	40	43	20
	阴 Shady	21	1 284	40	48	20
2 000	阴 Shady	32	1 365	65	2	25
	阴 Shady	30	1 340	45	22	35
	阴 Shady	22	1 314	50	11	70
	阴 Shady	24	1 377	35	22	40
2 500	阴 Shady	26	1 358	40	20	35
	阴 Shady	21	1 414	35	53	50
	阳 Sunny	20	1 369	60	10	30
	阳 Sunny	32	1 397	50	3	10
	阴 Shady	26	1 425	30	28	20
	阴 Shady	35	1 312	35	18	30
3 330	阴 Shady	26	1 374	40	20	50
	阴 Shady	29	1 425	45	20	20
	阳 Sunny	25	1 373	60	3	70
	阳 Sunny	29	1 345	70	3.5	40
	阳 Sunny	26	1 308	75	2.5	60
	阳 Sunny	33	1 400	60	7	35

500 cm 间隔 20 cm 采样,每个样地钻取 3 个点。采集的土样置于铝盒内,带回实验室,采用烘干法(105 °C,10 h)测定土壤质量含水量,某一栽植密度土壤含水量为不同重复样地平均值。

1.4 数据分析

本研究采用林木胸径、树高、冠幅来分析刺槐的生长状况,并采用单因素方差分析研究不同密度间这些指标的差异性。

采用 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 优势度指数、Pielou 均匀度指数测度刺槐林下植被的物种多样性,并计算刺槐林下物种的重要值。具体公式如下:

$$\text{Margalef 指数}(D') = \frac{S-1}{\ln N}$$

$$\text{Shannon-Wiener 指数}(H) = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$\text{Pielow 指数}(J) = H/\ln S$$

$$\text{Simpson 指数}(D) = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$IV = (\text{相对盖度} + \text{相对密度} + \text{相对频度})/3$$

式中,S 为观测到的物种总数(丰富度);N 为样方内所有物种个体数目; P_i 为第 i 个物种的个体数在全部个体中的比例(N_i/N);IV 为林下层物种的重要值。

2 结果与分析

2.1 刺槐林木生长对栽植密度的响应

2.1.1 不同栽植密度刺槐生长状况 15 年生不同密度刺槐林木生长状况存在差异(表 2),阳坡 4 种密度的刺槐平均树高在 5.9~8.9 m 之间,平均胸径在 6.3~10.0 cm 之间,平均冠幅在 2.5~4.3 m 之间;阴坡 3 个密度林木的平均树高在 6.5~7.4 m

之间,平均胸径在 6.4~8.3 cm,平均冠幅在 2.9~3.8 m 之间。随着栽植密度增大,2 种坡向林木平均胸径、平均树高和平均冠幅均逐渐降低。位于阳坡的各密度间平均树高、平均胸径存在显著差异,平均冠幅除了 2 500 株/ hm^2 和 3 330 株/ hm^2 的差异不显著外,其它密度间均差异显著($P < 0.05$);阴坡 3 种密度间 2 500 株/ hm^2 的平均树高、平均胸径显著低于 2 个低密度林分,平均冠幅显著高于 1 670 株/ hm^2 林分,而与 2 000 株/ hm^2 差异不显著,两个低密度间平均树高及平均胸径差异不显著,平均冠幅差异显著($P < 0.05$)。

2.1.2 相同密度不同坡向刺槐生长状况 相同密度不同坡向刺槐林木生长存在一定差异,当栽植密度在 1 670 株/ hm^2 时,阳坡刺槐林木生长好于阴坡,平均树高、平均胸径、平均冠幅均高于阴坡;当密度在 2 500 株/ hm^2 时,两种坡向刺槐平均树高、平均冠幅及平均胸径无显著差异。

2.2 林下植被对不同栽植密度的响应

2.2.1 不同栽植密度林下物种重要值 在阳坡立地下,除了密度为 830 株/ hm^2 的刺槐林下赖草(*Leymus secalinus*)重要值较低(<10%)外,其余密度林下狗尾草(*Setaria viridis*)及赖草的重要值均高,且优势地位明显,是林下的优势物种;其余物种(重要值>10%)在不同林分密度下存在一定差异(表 3);当密度为 1 670 株/ hm^2 时,林下形成赖草、狗尾草等禾草为主的优势群落,并伴随有牻牛儿苗、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等多年生草本以及牛皮消(*Cynanchum auriculatum*)、茭蒿等半灌木;当密度低于 2 500 株/ hm^2 时,多年生草本牻牛儿苗(*Erodium stephanianum*)在林下占据较高的重要值,而密度较高时,牻牛儿苗重要值下降明显,

表 2 不同坡向不同栽植密度下刺槐林木的主要生长指标

Table 2 Growth indexes of *R. pseudoacacia* under different planting densities

坡向 Aspect	栽植密度 Planting density / (plants · hm^{-2})	树高 Height/m	胸径 DBH/cm	冠幅 Crown width/m
阳坡 Sunny aspect	830	8.9 a	10.0 a	2.5 c
	1 670	7.9 b	8.9 b	3.2 b
	2 500	6.3 c	7.0 c	3.7 ab
	3 330	5.9 d	6.3 d	4.3 a
阴坡 Shady aspect	1 670	7.4 a	8.3 a	2.9 c
	2 000	6.8 ab	7.6 ab	3.2 ab
	2 500	6.5 c	6.4 c	3.8 a

注:同列数据后标不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著

Note: Different letters in the same column indicate significant differences at $P < 0.05$

表3 不同坡向不同栽植密度的刺槐林下植被主要物种重要值

Table 3 Importance value of main species of undergrowth under different planting densities

坡向 Aspect	栽植密度 Planting density (plants · hm ⁻²)	物种(重要值) Species (Importance value/%)
阳坡 Sunny aspect	830	狗尾草 <i>S. viridis</i> (72.7), 铁牛儿苗 <i>E. stephanianum</i> (30.6), 长芒草 <i>S. bungeana</i> (28.5), 糜子草 <i>C. squarrosa</i> (26.8)
	1 670	赖草 <i>L. secalinus</i> (60.1), 狗尾草 <i>S. viridis</i> (48.9), 铁牛儿苗 <i>E. stephanianum</i> (23.6), 牛皮消 <i>C. auriculatum</i> (20.8), 荸荠 <i>A. giraldis</i> (14.8), 阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i> (14.4)
	2 500	狗尾草 <i>S. viridis</i> (95.9), 赖草 <i>L. secalinus</i> (70.0), 猪毛菜 <i>S. collina</i> (25.9), 阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i> (10.1)
阴坡 Shady aspect	3 330	狗尾草 <i>S. viridis</i> (77.7), 赖草 <i>L. secalinus</i> (70.0), 达乌里胡枝子 <i>L. davurica</i> (20.4), 阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i> (18.4), 长芒草 <i>S. bungeana</i> (17.9), 猪毛菜 <i>S. collina</i> (14.8)
	1 670	铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i> (37.2), 糜子草 <i>C. squarrosa</i> (25.5), 狗尾草 <i>S. viridis</i> (22.7), 长芒草 <i>S. bungeana</i> (22.5), 赖草 <i>L. secalinus</i> (19.0), 阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i> (17.3), 抱茎苦荬菜 <i>I. sonchifolium</i> (11.8), 达乌里胡枝子 <i>L. davurica</i> (11.1)
	2 000	赖草 <i>L. secalinus</i> (33.1), 阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i> (32.2), 败酱 <i>P. scabiosifolia</i> (31.3), 长芒草 <i>S. bungeana</i> (30.6), 苦苣菜 <i>S. oleraceus</i> (24.3), 铁牛儿苗 <i>E. stephanianum</i> (19.9), 抱茎苦荬菜 <i>I. sonchifolium</i> (19.7), 猪毛菜 <i>S. collina</i> (15.1), 狗尾草 <i>S. viridis</i> (12.1), 硬质早熟禾 <i>P. sphondylodes</i> (11.2)
	2 500	赖草 <i>L. secalinus</i> (50.1), 铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i> (36.1), 硬质早熟禾 <i>P. sphondylodes</i> (21.9), 蒙古蒿 <i>A. mongolica</i> (20.8), 糜子草 <i>C. squarrosa</i> (17.7), 抱茎苦荬菜 <i>I. sonchifolium</i> (16.2), 苦苣菜 <i>S. oleraceus</i> (13.6), 狗尾草 <i>S. viridis</i> (13.1), 长芒草 <i>S. bungeana</i> (11.9), 阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i> (11.2)

注:本表只列出重要值>10%的物种

Note: Only the species with IV >10% are listed

表4 不同坡向不同栽植密度的刺槐林下植被物种多样性指数

Table 4 Diversity indexes of undergrowth under different planting densities

坡向 Aspect	栽植密度 Planting density (plants · hm ⁻²)	平均盖度 Average cover/%	丰富度指数 Margalef index	多样性指数 Shannon-Wiener index	均匀度指数 Pielow index	优势度指数 Simpson index
阳坡 Sunny aspect	830	17.2 a	2.16 b	1.50 b	0.6 a	0.79 a
	1 670	17.5 a	2.72 a	1.93 a	0.74 a	0.78 a
	2 500	6.4 b	2.30 b	1.60 b	0.55 a	0.78 a
阴坡 Shady aspect	3 330	4.5 b	2.03 b	1.59 b	0.66 a	0.69 a
	1 670	32.0 a	3.03 a	2.19 a	0.78 a	0.83 a
	2 000	29.9 a	3.64 a	2.49 a	0.84 a	0.89 a
	2 500	21.3 b	2.58 b	1.90 b	0.71 a	0.77 a

与此同时,一年生草本猪毛菜(*Salsola collina*)逐渐占据一定地位。

在阴坡,对于栽植密度为1 670株/hm²的林分,重要值>10%的林下物种有铁杆蒿、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、赖草、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)等8种物种,栽植密度为2 000株/hm²的林分,重要值>10%的林下物种有赖草、阿尔泰狗娃花、败酱(*Patrinia scabiosifolia*)、猪毛菜等10种物种,在密度2 500株/hm²的林分,重要值>10%的物种有赖草、铁杆蒿、硬质早熟禾(*Poa sphondylodes*)、蒙古蒿(*Artemisia mongolica*)等10种物种,且此时赖草和铁杆蒿重要值显著

高于其它物种,林下形成以二者为主体的优势群落。

2.2.2 不同栽植密度林下植被盖度及物种多样性

在阳坡,林下物种的平均盖度在830株/hm²和1 670株/hm²时相对较高,显著高于其它高密度林分($P<0.05$,表4);当栽植密度超过1 670株/hm²时,植被平均盖度下降明显,在密度为3 330株/hm²时,林下植被盖度仅为4.5%。Margalef指数和Shannon-Wiener指数在密度为1 670株/hm²时最高,且与其余各林分密度差异显著,而Pielow指数和Simpson指数在不同栽植密度间无显著差异($P>0.05$)。

在阴坡,物种的平均盖度在1 670株/hm²和2 000

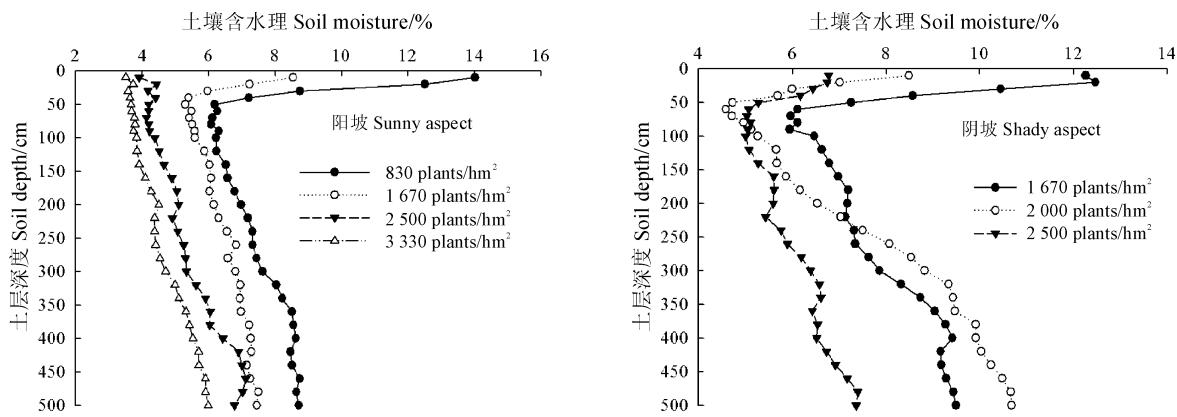


图1 相同坡向不同栽植密度下刺槐林地的土壤含水量垂直分布

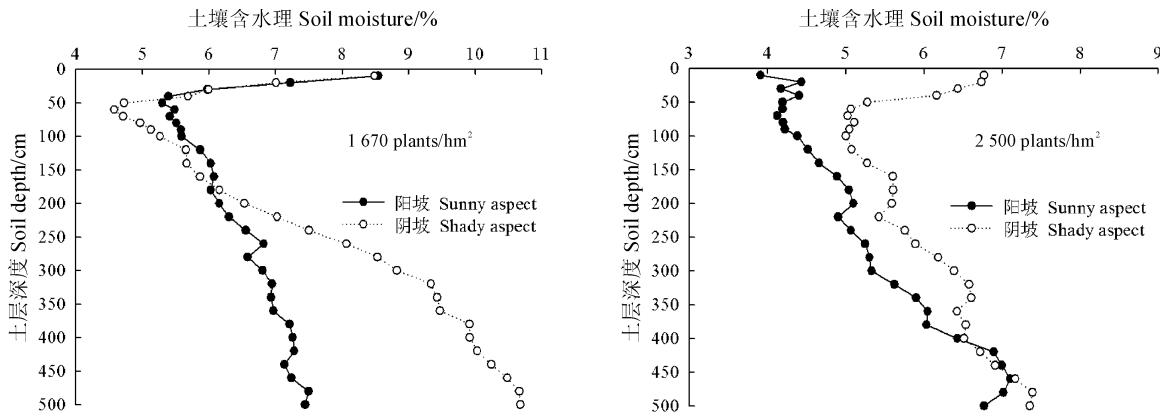
Fig. 1 Soil moisture vertical distribution of sampling plots with different planting densities of *R. pseudoacacia*

图2 相同栽植密度下不同坡向刺槐林地的土壤含水量垂直分布

Fig. 2 Soil moisture vertical distribution of sampling plots under different aspects with the same planting density of *R. pseudoacacia*

株/ hm^2 时最高, 显著高于 2 500 株/ hm^2 的林分 ($P < 0.05$) , Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数在密度 2 000 株/ hm^2 时最高, 且与其它密度间差异显著, Pielow 指数和 Simpson 指数在不同栽植密度间同样无显著差异。

2.3 林地土壤水分对栽植密度的响应

2.3.1 不同栽植密度刺槐林地土壤含水量 由于林木生长对水分消耗的不同, 不同栽植密度刺槐林地土壤含水量存在一定差异。各栽植密度林地 0~500 cm 土壤平均含水量均低于该地区土壤稳定湿度(12%)^[13]。由图 1 知, 阳坡立地下, 林地土壤含水量与栽植密度之间存在明显的负相关, 即密度越高, 土壤含水量越低。0~500 cm 土层土壤平均含水量表现为: 830 株/ hm^2 (7.82%)>1 670 株/ hm^2 (6.51%)>2 500 株/ hm^2 (5.24%)>3 300 株/ hm^2 (4.52%)。其中, 栽植密度为 3 300 株/ hm^2 的刺槐林地土壤干旱化最为严重, 在 0~380 cm 土深范围土壤含水量始终低于凋萎湿度(5%)^[13], 380 cm 以

下土壤含水量仍然处于较低的湿度范围, 平均只有 5.94%, 接近凋萎湿度; 栽植密度为 2 500 株/ hm^2 的林地土壤含水量随土层深度增加缓慢增大, 但在 0~220 cm 范围含水量只有 4.33%, 低于凋萎湿度; 栽植密度为 1 670 株/ hm^2 和 830 株/ hm^2 的林地含水量在 0~60 cm 范围内下降迅速, 但始终高于凋萎湿度, 在 60 cm 以下开始缓慢增加, 平均含水量分别为 6.55% 和 7.49%。阴坡立地下, 3 种密度刺槐林地 0~500 cm 平均含水量表现为: 2 000 株/ hm^2 (8.17%)>1 670 株/ hm^2 (7.55%)>2 500 株/ hm^2 (6.06%)。其中, 栽植密度为 2 000 株/ hm^2 的刺槐林地土壤水分在 0~120 cm 下降迅速, 120 cm 以下逐渐升高, 各层土壤水分始终高于凋萎湿度; 密度为 2 500 株/ hm^2 的刺槐林地土壤水分在 0~80 cm 下降迅速, 且在 40~80 cm 范围低于凋萎湿度, 80 cm 以下水分含量开始升高; 栽植密度为 1 670 株/ hm^2 的刺槐林地土壤水分在 0~100 cm 同样下降相对迅速, 平均含水量为 5.66%, 接近凋萎湿度, 100 cm 以

下水分逐渐恢复并呈缓慢增加的趋势,平均含水量达到 6.25%。

2.3.2 相同密度不同坡向刺槐林地土壤含水量

林地土壤含水量除了受密度影响外,坡向也是影响因素之一,为此,根据调查样地实际立地情况(表 1),比较了两种相同栽植密度下坡向对其的影响(图 2),结果表明,在中等密度 1 670 株/ hm^2 时,位于阳坡的刺槐林地在 0~160 cm 土壤水分始终高于阴坡,而在 160 cm 以下,阴坡土壤水分升高迅速,160~500 cm 土深范围平均达到 8.99%,远高于阳坡的 6.80%;而在较高密度 2 500 株/ hm^2 时,阴坡的刺槐林地各层土壤水分始终高于阳坡,即在高密度下,阴坡相比阳坡林地土壤水分更高。

3 讨 论

在陕北黄土丘陵沟壑区,营造刺槐林的主要功能是生态防护,林分结构越复杂其防护功能会越强^[21]。但现存的人工刺槐林林分密度普遍过高,不仅影响林木个体正常发育与林下植被的演替,而且出现了以土壤干化为主的土壤退化问题^[22]。因此,合理的刺槐林营造密度对该区生态恢复及可持续性维持至关重要。

3.1 不同栽植密度 15 年生刺槐生长状况

本研究中,由于林地水分及光照等条件的不同,高密度同低密度林分林木个体生长存在显著差异。在两种坡向下,刺槐平均胸径、平均树高、平均冠幅均随着密度增加而显著减小。在阳坡,密度 3 330 株/ hm^2 的林分个体平均胸径、树高比 1 670 株/ hm^2 分别低了 1.4、1.3 倍,平均冠幅高了 1.3 倍,与 830 株/ hm^2 的林分相比平均胸径、树高分别低了 1.6、1.5 倍,平均冠幅高了 1.7 倍;在阴坡,密度 2 500 株/ hm^2 的林分个体平均胸径、树高与 1 670 株/ hm^2 分别低了 1.1、1.3 倍,平均冠幅高出 1.3 倍。高密度刺槐受水分制约,个体生长相对较差。本研究区 3 330 株/ hm^2 下的刺槐栽植密度过高,林地土壤含水量极低(0~500 cm 平均含水量值仅 4.52%),导致刺槐林木生长普遍较差,平均胸径仅为 6.3 cm,平均树高为 5.9 m;而在黄土高原的方山地区,15 年生相同密度人工刺槐平均胸径为 6.6 cm,平均树高为 7.2 m^[23],可见二者胸径相差无几,但树高大于后者;在晋西黄土区蔡家川流域,17 年生相同高密度刺槐平均胸径为 6.2 cm,平均树高为 5.2 m;平均胸径和树高所差无几。而当处于 830 株/ hm^2 较低栽植密度时,林地土壤水分明显高于其它高密度

林分(0~500 cm 平均含水量值为 7.82%),此时,刺槐个体平均胸径达到 10.0 cm,平均树高为 8.9 m,这同渭北黄土高原淳化县 16 年生相近密度下刺槐树高生长(9.1 m)基本相同^[24],显著好于吴起地区人工刺槐胸径及树高生长状况(6.3 cm 和 5.9 m)^[25],略低于宜君地区的刺槐生长(10.5 cm 和 11 m)^[25],但同年降雨量相近的方山地区(胸径、树高分别为 17.1 cm 和 12.1 m)相比,仍存在一定差距。

3.2 林下植被对刺槐栽植密度的响应

本研究发现,不同密度刺槐林下植被主要由旱生或旱中型草本构成,林下灌木分布稀少。这与该地区之前的相关研究结论一致^[26-27],也同该地区自然植被组成存在较大差异^[28-30]。这是由于在没有外界干扰的条件下,植被恢复是一个自行向该区地带被植被演替的过程,而刺槐作为绝对优势种的出现对林地的光照、水分等资源进行重新分配,进而影响林下植被的发育^[20]。同时,灌木对生长环境条件的要求相对较高,而林地光照、土壤水分等条件相对较差,没有更多的资源供给灌木生长,从而制约了林下灌木层的发育。在物种组成上,不同密度刺槐林林下植被存在一定差异。阳坡立地下,当密度为 830 株/ hm^2 时,林下以一年生禾草和多年生牻牛儿苗为主,其中,狗尾草是林下的优势物种;当密度在 1 670 株/ hm^2 左右时,赖草和狗尾草在林下优势地位明显,并伴随有牻牛儿苗、阿尔泰狗娃花等多年生草本及牛皮消和菱蒿等耐旱类半灌木,此时林下植被平均盖度最高,且 Margalef 指数和 Shannon-wiener 指数最高;当密度超过 2 500 株/ hm^2 时,狗尾草和赖草仍然在林下形成优势群落,而牻牛儿苗优势地位下降明显,与此同时,一年生草本猪毛菜开始占据一定地位,且林下层盖度随着密度增加开始下降。在阴坡,栽植密度为 1 670 株/ hm^2 的林分,林下优势物种主要为以铁杆蒿为首的一年生禾草、狗尾草、长芒草等为主的一年生禾草;2 000 株/ hm^2 的林分,重要值较高的物种有赖草、阿尔泰狗娃花、败酱、长芒草等一年生草本;随着栽植密度继续增大,达到 2 500 株/ hm^2 时,硬质早熟禾和蒙古蒿在林下占据一定重要地位,赖草和铁杆蒿仍是重要值最高的物种,此时林下植被平均盖度小于前 2 种密度,且各项多样性指数也均低于前 2 种密度下的林分。整体来看,当阳坡刺槐栽植密度在 1 670 株/ hm^2 左右,阴坡刺槐密度保持在 1 670~2 000 株/ hm^2 左右时,林下植被平均盖度相对较高,各多样性指数也相对较高,林下植被恢复相对较好,这同之前

研究得出的中等密度下刺槐林下植被恢复相对更好的结论基本一致^[31-32]。

3.3 林地土壤水分与密度和地形的关系

在黄土高原地区,由于其特有的地形地貌和气候特征,绝大部分的人工林草植被形成了利用性干层。草本植被根系较浅,蒸腾作用较小,难以形成持久的土壤干层,但人工林都能形成土壤干层^[33-34]。有研究表明,16年刺槐林用水深度超过500 cm,强烈耗水层为300~450 cm^[35];且林地140 cm以下可形成稳定低湿层^[36]。一般情况下,刺槐林地降水入渗深度一般在150 cm以内^[37],在2013年7月极端强降雨条件下可补充至300 cm以下^[38]。本研究中,阳坡立地下,林地土壤含水量与栽植密度之间存在明显的负相关,0~500 cm土壤平均含水量表现为:830株/hm²>1 670株/hm²>2 500株/hm²>3 300株/hm²。其中,3 333株/hm²刺槐林地5 m土深平均含水量仅为4.52%,低于该地区凋萎湿度(5%),土壤干旱化十分严重。阴坡立地下,3种密度刺槐林地0~500 cm平均含水量表现为:2 000株/hm²>1 670株/hm²>2 500株/hm²。土壤含水量受植被和地形的共同影响。3 333株/hm²的样地均位于阳坡,接受太阳辐射强,水分蒸发强烈,土壤含水量相对较小^[39];且样地平均坡度29°,相对较大,坡度越大,坡面径流量越多,坡面接受降水的有效面积减小,降雨就地入渗减少^[40],从而综合导致了林地土壤含水量较低。2 000株/hm²的刺槐样地平均坡度23°,相对最低,加上林分郁闭度相对较低,只有40%左右,降低了林地蒸腾作用;此外,较低的郁闭度减缓了树冠截流,使落于地表的降水增加,一定程度提高了土壤水分补给^[41]。

3.4 刺槐林的合理密度

黄土高原半干旱区,满足水量平衡的造林密度

和后期适宜的密度调控,是保持防护林林分生长稳定的关键^[42]。在陇东半干旱区,有研究从刺槐林的水土保持目的出发,认为刺槐在营造5年后郁闭度应达到0.3,根据这一标准通过模型计算得出刺槐的初植密度应不低于2 303株/hm²^[16]。有学者从林分生长状况,恢复地表草本植物多样性,改良土壤物理性质的角度出发,认为在山西省吉县蔡家川流域营造刺槐林时密度以1 325株/hm²为宜^[18];如果从刺槐林地土壤水分的有效性出发,突出水土保持这一目的,则刺槐成林密度应控制在700株/hm²以内,幼林的密度应控制在2 300株/hm²以内^[43]。而在方山县土桥沟流域,刺槐的间伐密度为1 110株/hm²左右,这时的林下植被层生物多样性和生物量提高明显,而且林冠层林木的生产力也能达到较高水平^[17]。在黄土高原地区,营造刺槐林的主要目的是保持水土及促进地区生态植被恢复,本研究通过对陕北安塞县退耕15年左右刺槐人工林现状的调查,综合刺槐林分生长、林下植被及土壤水分状况,认为刺槐初始造林密度不宜超过1 670株/hm²(株行距2 m×3 m),这样的密度下成林后林分郁闭合理,林下物种丰富、平均盖度及物种多样性相对较高,且林木生长及林地土壤水分状况相对较好。此外,对现存的密度过大、郁闭度过高的林分,应及时进行间伐管理。有研究表明,当林分生长至郁闭度0.6以上时,就需要对其密度进行及时调节,以促进林木的正常生长发育,提高林分单位面积的生产力和生物量,最大限度地发挥其经济效益和防护效益^[16]。对于密度较低的刺槐林分,可通过后期补栽并给予及时抚育管理以改善林分质量;也可按照一定比例适当套作一些乡土树种进行混交种植,通过营林模式的转变来改善林分整体状况,进而维持人工林健康发育和可持续性。

参考文献:

- [1] BOLAT I, SENSORY H, ÖZER D. Short-term changes in microbial biomass and activity in soils under black locust trees (*Robinia pseudoacacia* L.) in the northwest of Turkey [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, **15**(11): 2 189-2 198.
- [2] SITZIA T, CAMPAGNARO T, DAINESI M, et al. Plant species diversity in alien black locust stands: A paired comparison with native stands across a North-mediterranean range expansion[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, **285**(1): 85-91.
- [3] BORING L, SWANK W. The role of black locust (*Robinia pseudoacacia*) in forest succession[J]. *Journal of Ecology*, 1982, **72**(1): 749-766.
- [4] CIERJACKS A, KOWARIK I, JOSHI J, et al. Biological Flora of the British Isles: *Robinia pseudoacacia* [J]. *Journal of Ecology*, 2013, **101**(3): 1 623-1 640.
- [5] 陈洪松,王克林,邵明安.黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展[J].林业科学,2005,**41**(4): 155-161.
CHEN H S, WANG K L, SHAO M A. A review on the effect of vegetation rehabilitation on the desiccation of deep soil layer on the Loess Plateau[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, **41**(4): 155-161.
- [6] 李玉山.黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J].自然资源学报,2001,**16**(5): 427-432.

- LI Y S. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, **16**(5): 427-432.
- [7] 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]. 中国水土保持科学, 1999, (5): 11-14.
- HOU Q C, HAN R L, HAN S F. A preliminary study on the soil dry layer in the artificial forest on the Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 1999, (5): 11-14.
- [8] 王梅, 张文辉. 不同密度油松人工林生长更新状况及群落结构[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, **37**(7): 75-80.
- WANG M, ZHANG W H. Growth, regeneration and community structure of *Pinus tabulaeformis* artificial forest under different densities[J]. *Journal of Northwest A&F University* (Nat. Sci. Ed.), 2009, **37**(7): 75-80.
- [9] 移小勇, 赵哈林, 崔建垣等. 科尔沁沙地不同密度(小面积)樟子松人工林生长状况[J]. 生态学报, 2006, **26**(4): 1 200-1 206.
- YI X X, ZHAO H L, CUI J H, et al. Growth of small area *Pinus sylvestris* var. *mongolica* artificial forest under different densities in Horqin Sandy Land, North of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(4): 1 200-1 206.
- [10] 张建军, 毕华兴, 魏天兴. 晋西黄土区不同密度林分的水土保持作用研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, **24**(3): 50-53.
- ZHANG J J, BI H X, WEI T X. Functions of soil and water conservation of forest stands with different densities in loess area in western Shanxi, China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, **24**(3): 50-53.
- [11] 周晓新, 张建军, 隋旭红等. 不同密度刺槐林在蒸腾旺季的蒸腾特征[J]. 水土保持通报, 2010, **30**(3): 41-47.
- ZHOU X X, ZHANG J J, SUI X H, et al. Transpiration characteristics of *Robinia Pseudoacacia* L. with different densities during the peak season[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, **30**(3): 41-47.
- [12] 李世荣, 张卫强, 贺康宁. 黄土半干旱区不同密度刺槐林地的土壤水分动态[J]. 中国水土保持科学, 2003, **1**(2): 28-32.
- LI S R, ZHANG W Q, HE K N. Moisture dynamic of the *Robinia pseudoacacia* with different density in semi-arid region on the Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2003, **1**(2): 28-32.
- [13] 李军, 王学春, 邵明安等. 黄土高原不同密度刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林地水分生产力与土壤干燥化效应模拟[J]. 生态学报, 2008, **28**(7): 3 126-3 141.
- LI J, WANG X C, SHAO M A, et al. Simulation of water productivity and soil desiccation effects of different planting density black locust forestlands on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(7): 3 126-3 141.
- [14] 王百田, 王颖, 郭江红等. 黄土高原半干旱地区刺槐人工林密度与地上生物量效应[J]. 中国水土保持科学, 2005, **3**(3): 35-39.
- WANG B T, WANG Y, GUO J H, et al. Effect on biomass of stand density of artificial Black Locust forest in semi-arid region of Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, **3**(3): 35-39.
- [15] 王玉, 郭建斌. 黄土高原半干旱区刺槐人工林群落物种多样性研究[J]. 四川林勘设计, 2008,(1): 11-16.
- WANG Y, GUO J B. Study on species diversity of *Robinia pseudoacacia* plantation community at semi-arid region on
- Loess Plateau [J]. *Sichuan Forestry Exploration and Design*, 2008, (1): 11-16.
- [16] 卞义宁. 陇东半干旱地区刺槐水保林合理密度分析与探讨[J]. 中国水土保持, 1999, (3): 22-25.
- BIAN Y N. Probe into reasonable density of locust forest in semi-arid area of east Gansu Province[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 1999, (3): 22-25.
- [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, **15**(1): 83-86.
- WU S H, ZHU Q K, YU X X, et al. Calculation and analysis of proper stand density of main afforestation species in western Shanxi of Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, **15**(1): 83-86.
- [18] 张瑞, 张建军, 赖宗瑞. 晋西黄土高原水土保持林适宜密度研究[J]. 水土保持通报, 2009, **29**(4): 67-76.
- ZHANG R, ZHANG J J, LAI Z R. Best density of soil and water conservation forest on Loess Plateau of western Shanxi Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, **29**(4): 67-76.
- [19] 吴旭, 陈云明, 唐亚坤. 黄土丘陵区刺槐和侧柏人工林树干液流特征及其对降水的响应[J]. 植物生态学报, 2015, **39**(12): 1 176-1 187.
- WU X, CHEN Y M, TANG Y K. Sap flow characteristics and its responses to precipitation in *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus orientalis* plantations[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, **39**(12): 1 176-1 187.
- [20] 王军, 付博杰, 邱扬等. 黄土高原小流域土壤养分的空间异质性[J]. 生态学报, 2002, **22**(8): 1 173-1 178.
- WANG J, FU B J, QIU Y, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(8): 1 173-1 178.
- [21] 王克勤, 王斌瑞. 黄土高原刺槐林间伐改造研究[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(1): 11-15.
- WANG K Q, WANG B R. Study on thinning to *Robinia pseudoacacia* forest on the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(1): 11-15.
- [22] 王克勤, 王斌瑞. 集水造林防止人工林植被土壤干化的初步研究[J]. 林业科学, 1998, **34**(4): 14-21.
- WANG K Q, WANG B R. The initial studies on afforestation by water-harvesting to prevent soil desiccation of artificial plantation[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1998, **34**(4): 14-21.
- [23] 王克勤, 王百田, 王斌瑞等. 集水造林不同密度林分生长研究[J]. 林业科学, 2002, **38**(2): 54-60.
- WANG K Q, WANG B T, WANG B R, et al. Studies on the growth of forests with different density in the system of afforestation by water-harvesting[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, **38**(2): 54-60.
- [24] 杨晓毅, 李凯荣, 李苗等. 陕西省淳化县人工刺槐林林分结构及林下植物多样性研究[J]. 水土保持通报, 2011, **31**(3): 194-202.
- YANG X Y, LI K R, LI M, et al. Forest structure and diversity of *Robinia pseudoacacia* L. plantations in Chunhua County of Shaanxi Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, **31**(3): 194-202.
- [25] 王力, 邵明安, 李裕元. 陕北黄土高原人工刺槐林生长与土壤干化的关系研究[J]. 林业科学, 2004, **40**(1): 83-91.

- WANG L, SHAO M A, LI Y Y. Study on relationship between growth of artificial *Robinia pseudoacacia* plantation and soil desiccation in the Loess Plateau of northern Shaanxi Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, **40**(1): 83-91.
- [26] 曲 红, 王百田, 王 棣, 等. 黄土区不同配置人工林物质多样性研究[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(4): 843-848.
- QU H, WANG B T, WANG D, et al. Research of artificial forest plant diversity under different configuration of loess area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(4): 843-848.
- [27] KOU M, PATRICIO G F, HU S, et al. The effect of *Robinia pseudoacacia* afforestation on soil and vegetation properties in the Loess Plateau (China): A chronosequence approach [J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 375: 146-158.
- [28] 白文娟, 焦菊英, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植物群落的分类与排序[J]. 西北植物学报, 2005, **25**(7): 1 317-1 322.
- BAI W J, JIAO J Y, et al. Classification and ranking of the forae naturally recuperating on the farming-withdrawn land in the hilly and gully regions of the Loess Plateau[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2005, **25**(7): 1 317-1 322.
- [29] 焦菊英, 张振国, 贾燕锋, 等. 陕北丘陵沟壑区撂荒地自然恢复植被的组成结构与数量分类[J]. 生态学报, 2008, **28**(7): 2 891-2 997.
- JIAO J Y, ZHANG Z G, JIA Y F, et al. Species composition and classification of natural vegetation in the abandoned lands of the hilly-gullied region of northern Shaanxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(7): 2 891-2 997.
- [30] KOU M, JIAO J J, YIN Q L, et al. Successional trajectory over 10 years of vegetation restoration of abandoned slope cropland in the hill-gully region pf the loess plateau[J]. *Land Degradation and Development*, 2016, 27: 919-932.
- [31] 刘建利, 李凯荣, 易 亮, 等. 黄土高原丘陵区人工刺槐林分结构及林下植物多样性研究[J]. 水土保持通报, 2008, **28**(3): 49-53.
- LIU J L, LI K R, YI L, et al. Structure of *Robinia Pseudocacia* plantation and undergrowth plant diversity in the hilly area of the Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, **28**(3): 49-53.
- [32] 王春香, 张建军, 等. 晋西黄土区刺槐林下植被物种组成及多样性影响因素[J]. 东北林业大学学报, 2014, **42**(1): 31-36.
- WANG C X, ZHANG J J, et al. Factors of composition and diversity of undergrowth vegetation species of *Robinia Pseudocacia* forests in Loess Region of western Shanxi Province [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, **42**(1): 31-36.
- [33] 王志强, 刘宝元, 张 岩. 不同植被类型对厚层黄土剖面水分含量的影响[J]. 地理学报, 2008, **63**(7): 703-713.
- WANG Z Q, LIU B Y, ZHANG Y. Effects of different vegetation types on soil moisture in deep loess soil profiles[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, **63**(7): 703-713.
- [34] 杨文治, 韩仕峰. 黄土丘陵区人工林草地的土壤水分生态环境 [C]//中国科学院西北水土保持研究所集刊. 西安: 陕西科学技术出版社, 1985:18-28.
- [35] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林[J]. 自然资源学报, 2001, **16**(5): 432-438.
- YANG W Z. Soil water resources and afforestation in Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, **16**(5): 432-438.
- [36] 刘江华, 刘国彬, 侯禧禄, 等. 刺槐林地土壤水分与林下植物群落生物量的关系[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(3): 43-46.
- LIU J H, LIU G B, HOU X L, et al. Relationship between soil moisture of *Robinia pseudoacacia* forests and aboveground biomass of understory vegetation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, **22**(3): 43-46.
- [37] 李洪建, 王孟本, 陈良富, 等. 刺槐林水分生态研究[J]. 植物生态学报, 1996, **20**(2): 151-158.
- LI H J, WANG M B, CEHN L F, et al. Study on hydrologic ecology of *Robinia pseudoacacia* population in northwestern Shanxi[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1996, **20**(2): 151-158.
- [38] 尹秋龙, 焦菊英, 寇 萌. 极端强降雨条件下黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分特征[J]. 自然资源学报, 2015, **30**(3): 460-469.
- YIN Q L, JIAO J Y, KOU M. The soil moisture characteristics under different vegetation types after extremely heavy rainfall on the hilly-gullied Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(3): 460-469.
- [39] 刘 鑫, 毕华兴, 李笑吟, 等. 晋西黄土区基于地形因子的土壤水分分异规律研究[J]. 土壤学报, 2007, **44**(3): 411-417.
- LIU X, BI H X, LI X Y, et al. Variation of soil moisture in relation to topographic factors in Loess Region of west Shanxi [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, **44**(3): 411-417.
- [40] 胡良军, 邵明安, 杨文治, 等. 黄土高原土壤水分的空间分异及其与林草布局的关系[J]. 草业学报, 2004, **13**(6): 14-20.
- HU L J, SHAO M A, YANG W Z, et al. Relationship between vegetation spatial collocations and soil moisture spatial heterogeneities in the Loess Plateau area[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2004, **13**(6): 14-20.
- [41] 张 波, 张建军, 李铁涛, 等. 黄土区刺槐林地土壤水分剖面的垂直分层[J]. 中国水土保持科学, 2010, **8**(4): 39-44.
- ZHANG B, ZHANG J J, LI Y T, et al. Vertical stratification of soil moisture profile of *Robinia pseudoacacia* plantation in Loess Region[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, **8**(4): 39-44.
- [42] 刘晨峰, 尹 婧, 贺康宇. 林下植被对半干旱区不同密度刺槐林地土壤水分环境的指示作用[J]. 中国水土保持科学, 2004, **2**(2): 62-67.
- LIU C F, YIN J, HE K N. Influence of sediment-laden flow on infiltration capacity of soil at site of afforestation[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, **2**(2): 62-67.
- [43] 张建军, 贺 维, 纳 磊. 黄土区刺槐和油松水土保持林合理密度的研究[J]. 中国水土保持科学, 2007, **5**(2): 55-59.
- ZHANG J J, HE W, NA L. Study on appropriate density of *Pinus tabulaeformis* and *Robinia Pseudoacacia* for soil and water conservation forests in Loess area[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, **5**(2): 55-59.