

晋西黄土区主要造林树种林地土壤水分生态条件分析\*

陈丽华,鲁绍伟,张学培,余新晓,孙中峰

(北京林业大学 水土保持学院 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室,北京 100083)

摘 要:黄土高原地区植被建设引起的土壤水分效应问题愈来愈受到关注,林地的水分生态条件分析成为构建结构稳定的森林植被的前提,以晋西黄土区主要造林树种刺槐、油松和侧柏的坡面林地为研究对象,通过林地土壤水分特征曲线测定及土壤水分动态变化监测,探讨其生长的水分生态条件,结果表明:本区人工林地的土壤持水力较高,土壤含水率随水势降低而递减的速度较慢;研究区主要造林树种中,刺槐及其混交林分的土壤水分利用范围最大,抗旱能力最强;无论丰水年或枯水年,坡面各林地土壤水分有效利用性大,土壤含水量在生长季都高于无效水临界值,林地土壤水分利用状况好,林分生长稳定。

关键词:造林树种;土壤水分特性;土壤水分特征曲线;黄土区

中图分类号:S715.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2008)01-0079-04

Analysis of Soil Water Content of Main Afforestation Species  
in Western Shanxi of Loess Plateau

CHEN Li-hua, LU Shao-wei, ZHANG Xue-pei, YU Xin-xiao, SUN Zhong-feng

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Combating Desertification, Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Soil water content change causing by vegetation construction in Loess area was more and more attracting researchers' notice. Forest water condition analysis was the basis of construction of stable vegetation structure. This paper analyzed forest water condition of the main afforestation species in western Shanxi of Loess Plateau such as *Pinus tabulaeformis*, *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus orientalis*, according to the soil water characteristic curves and soil water dynamic changes. Through comparing variety plants, the *Robinia pseudoacacia* and its mixed forest stand have the most preventing drought abilities. Whether in wet year or in dry year, soil water content of all testing forest stand were all higher than its unavailable soil water threshold value during growing season, and forest stand could grow stable and healthy.

Key words: afforestation tree species; characteristic of soil water; soil water characteristic curve; Loess area

1 引 言

黄土高原是世界上水土流失最严重与生态环境最脆弱的地区之一,近年来在黄土高原地区不断开展退耕还林、植被恢复与建设以改善生态环境<sup>[1]</sup>。而干旱半干旱的黄土区,降水量少且时空分布不均,黄土深厚疏松,水分在土壤中再分配作用明显,因此土壤水分成为制约黄土区生态环境建设的“瓶颈问题”<sup>[2-4]</sup>。黄土高原植被建设引起的土壤水文效应问题日益引起人们的重视,林地土壤水分的承载能力已经成为当今科研的热门课题<sup>[5]</sup>。水分是影响植物生长的重要因素,由于土壤宛如一个巨大的蓄水库,不断地供给植被以水分营养,林植被才得以繁衍生长<sup>[6]</sup>。林地水分生态条件是气候、植被、地形及土壤因素等自然条件的综合反映,只有水、土、植物相融,植被才能生长繁茂<sup>[7]</sup>。土壤水分特征曲线表示土壤水的基质势或土壤水吸力随土壤含水量而变化的曲线。它反映土壤水能量和数量之间的关系,是研究土壤水分运动和保持的基本曲线,了解土壤的土壤水分特征曲线,对于研究土壤水分的储存、保持、运动、供应,SPAC中的水分

动态,土壤水分与林木吸水之间关系的机理与状况都有重要意义<sup>[8-11]</sup>。

2 研究区概况及研究方法

2.1 试验区概况

研究区为山西省吉县蔡家川嵌套流域,位于黄土高原西南部,位于北纬 35°33' - 36°21',东经 110°27' - 111°07'。年平均降水量为 579.5 mm,集中于 7 - 9 月,无霜期平均 170 d 左右,年平均气温 10℃。属于暖温带、半湿润地区,半湿生落叶阔叶林与森林草原地带。土壤类型为褐土,普遍呈碱性。流域中上游植被类型主要为白桦(*Betula platyphylloides*)、山杨(*Populus davidiana*)、丁香(*Syringa oblata*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana* Decne)等组成的天然次生林,中游为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等树种组成的人工林及天然草本植被,以及山杨(*Populus davidiana*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、绣线菊(*Spiraea thunbergii*)、黄刺玫(*Rosa Yanthin* Lndl)等组成的天然次生灌草植被为主。

\* 收稿日期:2006-12-29

基金项目:林业科学技术研究项目(2003-045-L45)

作者简介:陈丽华(1959 - ),女,北京人,教授,博士生导师,主要从事农田水利与水土保持研究。

2.2 研究方法

在蔡家川试验区分别选取主要造林树种的坡面林地刺槐林、油松林、侧柏林、刺槐和油松混交林、刺槐和侧柏混交林及天然次生林等 6 块典型林分作为研究对象,基本情况见表 1 和表 2。

表 1 样地基本情况

类型	林龄/a	栽植方式	平均树高/ m	平均胸径/ cm	坡向	坡度/ (°)	密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )
刺槐林	11	水平阶	5.68	5.44	S	25	2204
油松林	12	水平阶	4.47	6.93	NE40°	19	1667
侧柏林	12	水平阶	3.21	3.23	S	19	1818
刺槐×油松	12×7	水平阶、同穴	5.3×2.9	5.1×3.1	NE21°	22	1111×1111
刺槐×侧柏	14×12	水平阶、行混	7.2×4.6	6.9×4.5	ES25°	28	1300×600
天然次生林	-	-	-	-	NE39°	26	-

表 2 样地土壤剖面部分理化性状

样地	采样深度/ cm	有机质/ %	pH	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/ %	最大吸湿水/ %	土壤质地
刺槐	0 - 20	1.17	8.4	1.05	51.7	5.27	中壤土
	20 - 50	0.59	8.45	1.15	46.7		
	50 - 100	0.328	8.6	1.22	44.5		
油松	0 - 20	1.103	8.3	1.03	41.6	5.84	中壤土
	20 - 50	0.746	8.45	1.19	44.6		
	50 - 100	0.594	8.5	1.32	42.0		
侧柏	0 - 20	1.017	8.5	1.05	40.6	5.15	中壤土
	20 - 50	0.624	8.3	1.23	44.7		
	50 - 100	0.484	8.2	1.26	41.0		
油松×刺槐	0 - 20	1.425	8.4	1.11	43.9	5.88	中壤土
	20 - 50	0.557	8.5	1.21	48.0		
	50 - 100	0.447	8.45	1.28	41.7		
侧柏×刺槐	0 - 20	1.241	8.4	1.05	36.1	5.32	中壤土
	20 - 50	0.793	8.5	1.28	42.3		
	50 - 100	0.633	8.6	1.32	39.8		
天然次生林	0 - 20	1.517	8.4	1.08	45.8	6.42	中壤土
	20 - 50	0.806	8.5	1.17	38.1		
	50 - 100	0.642	8.3	1.17	42.0		

2.2.1 降雨量测定

在研究区布置 8 台自记雨量计,常年观测记录降雨量和降雨过程。

2.2.2 林地土壤水分特征曲线测定

选取林地土样,用环刀采单个原状土样,在实验室中使之饱和,利用日产离心机 H-1400DF 在不同转速下离心 60~70 min,使之达到水分平衡,称重。离心结束后土样烘干(105℃)称重,计算不同水势下的土壤含水量。

转速为  $n_i$  (r/min) 时的土壤水势  $\psi_i$  (10<sup>5</sup> Pa) 为

$$PF = 2\lg n + \lg h + \lg \left(r - \frac{h}{2}\right) - 4.95 \tag{1}$$

式中: $n$ ——每分钟转数(r/min); $h$ ——环刀平均尺寸; $r$ ——环刀下部回转半径。土壤水势为  $\psi_i$  时的土壤含水量为:

$$SWC = [( \psi_i \text{ 时的土壤湿重} - \text{烘干土样重}) / \text{烘干土样重}] \tag{2}$$

2.2.3 土壤水分动态变化测定

分别在 6 块典型样地,利用烘干法(105℃)测定土壤含水量。将测深 100 cm 的土壤剖面划分为 5 层,分别在 0~20,20~40,40~60,60~80,80~100 cm 各层每次 3 个样品。在年生长季(4~10 月)每月上、中旬取样,并进行 0~200 cm 深度的不定期测试。根据各层土壤含水量、土层深度和土壤容重计算土壤贮水量。

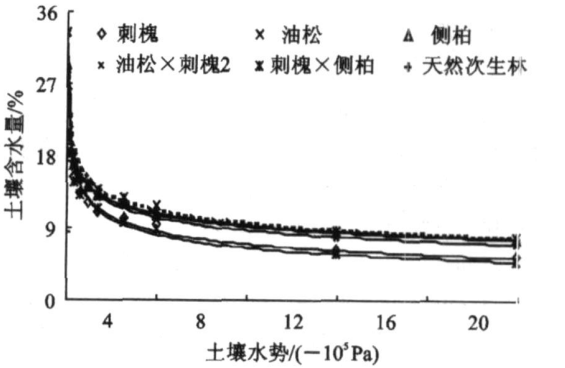


图 1 样地 40 - 60 cm 的土壤水分特征曲线

3 结果与分析

3.1 林地土壤持水特性

土壤水分特征曲线反映土壤水和土壤固体之间的相互关系,即土壤颗粒的表面吸附力和土壤孔隙的毛管力对土壤水的作用,因此反映了土壤持水的基本特性。图 1 为 6 块典型样地的土壤水分特征曲线。为了更确切地描述和预测土壤的持水特性,根据实测数据进行拟合来获得 6 块样地(表 2)40 - 60 cm 层土壤水分特征曲线模型。根据 Gardner 的幂函数经验公式:

$$\theta = aS^{-b} \tag{3}$$

式中:  $(-i)$  ——土壤水势 ( $10^5$  Pa, 取绝对值);  $S$  ( $SWC$ ) ——土壤含水量。  
经转换以  $S$  为因变量的关系式:  
$$S = A \cdot (-B) \tag{4}$$

式中: $A$  ——曲线高低,即持水能力的大小, $A$  值越大,持水能力越强。当  $A$  值不变时, $B$  值越大( $0 < B < 1$ ),则曲线越靠近  $y$  轴,反映土壤水势值变化时,土壤含水量变化的快慢程度。具体拟合结果见表 3。

表 3 不同林分持水曲线经验方程的拟合结果

林分类型	$A$	$B$	$A \cdot B$	$B + 1$	回归方程( $S = A \cdot (-B)$ )	$R^2$
侧柏林	14. 849	0. 2038	3. 026	1. 2038	$S = 14. 849 \cdot (-0. 2032)$	0. 9937
油松 ×刺槐	14. 766	0. 2246	3. 316	1. 2246	$S = 14. 766 \cdot (-0. 2246)$	0. 9799
刺槐林	13. 206	0. 2701	3. 567	1. 2701	$S = 13. 206 \cdot (-0. 2701)$	0. 9789
油松林	15. 639	0. 2132	3. 334	1. 2132	$S = 15. 639 \cdot (-0. 2132)$	0. 9832
刺槐 ×侧柏	13. 044	0. 2951	3. 849	1. 2951	$S = 13. 044 \cdot (-0. 2951)$	0. 9636
天然次生林	14. 934	0. 1982	2. 960	1. 1982	$S = 14. 934 \cdot (-0. 1982)$	0. 9979

注:采样深度为 40 - 60 cm,下表同。

以表 3 所示各模型参数  $A$  为指标,6 种实验地的持水能力为:刺槐和侧柏混交林 < 刺槐林 < 油松和刺槐混交林 < 侧柏林 < 天然次生林 < 油松林。由参数  $B$  可见,土壤含水率随水势降低而递减的速度,以天然次生林地为最慢。

土壤所含水分可分为重力水、有效水(速效水与迟效水)和无效水。一般将田间持水量作为重力水与有效水的分界点,即有效水的上限。根据原状土测定的田间持水量值反查土壤水分特征曲线模型,试验样地土壤的田间持水量相当于  $(-0.2 \sim -0.3) \times 10^5$  Pa 水势时的土壤持水量。造林树种

的永久凋萎点达到  $-20 \times 10^5$  Pa 以下,可将  $-20 \times 10^5$  Pa 作为有效水下限。在有效水范围内,随着土壤水势下降,即含水量降低,植物根系吸收水分的难度增加。因树木的暂时凋萎点可达  $-10 \times 10^5$  Pa 以下, $-10 \times 10^5$  Pa 水势值是水容量变化的关键点之一,因此可将  $-10 \times 10^5$  Pa 作为迟效水的上限。由此即可对试验地土壤水分作如下分类: $> -0.3 \times 10^5$  Pa 为重力水; $(-0.3 \sim -20) \times 10^5$  Pa 为有效水,其中  $(-0.3 \sim -10) \times 10^5$  Pa 为速效水, $(-10 \sim -20) \times 10^5$  Pa 为迟效水; $< -20 \times 10^5$  Pa 为无效水。

表 4 林地土壤水分分类与含量 %

样地	重力流出水	有效水			无效水
		全效水	速效水	迟效水	
侧柏林	> 18. 978	18. 978 ~ 8. 064	18. 978 ~ 9. 287	9. 287 ~ 8. 064	< 8. 064
油松 ×刺槐	> 19. 351	19. 351 ~ 7. 534	19. 351 ~ 8. 804	8. 804 ~ 7. 534	< 7. 534
刺槐林	> 18. 281	18. 281 ~ 5. 880	18. 281 ~ 6. 994	6. 994 ~ 5. 880	< 5. 880
油松林	> 20. 216	20. 216 ~ 8. 257	20. 216 ~ 9. 572	9. 572 ~ 8. 257	< 8. 257
刺槐 ×侧柏	> 18. 609	18. 609 ~ 5. 389	18. 609 ~ 6. 612	6. 612 ~ 5. 389	< 5. 389
天然林	> 18. 959	18. 959 ~ 8. 250	18. 959 ~ 9. 462	9. 462 ~ 8. 250	< 8. 250

对 6 种不同林地的土壤水分进行分类,见表 4,刺槐和侧柏混交林利用水分的能力最强,其有效水的范围可以达到 5.4 % 以上,其次为刺槐纯林,可达 5.9 % 以上,以下为油松和刺槐混交林、侧柏林、天然次生林、油松林。就潜在有效水范围来看,刺槐及其混交林分的利用范围较大。

3.2 林地土壤供水特性

土壤的供水性是指在一定条件下土壤对植物生理需水的供给能力,这种能力的强弱在很大程度上取决于土壤的有效水储量。土壤比水容量表明单位水势变化时土壤吸入或释放出的水量,是土壤释水的量化指标,在评价土壤水分的有效性程度方面具有极重要意义。比水容量( $C$ )在数值上

等于土壤水分特征曲线的斜率,对(4)式求导便得:

$$C = - \frac{dSWC}{d(-i)} = A \cdot B \cdot (-B+1) \tag{5}$$

由(5)式可知,当  $B = 1$  时( $-1 \times 10^5$  Pa), $C = A \cdot B$ ,也即  $A \cdot B/1\,000$  是土壤水势为  $1 \times 10^5$  Pa 时的比水容量[ml/( $10^5$  Pa · g)]。而  $(B + 1)$  表明,比水容量随水势的变化远比含水量变化快。

根据(5)式计算出的各试验地的土壤比水容量见表 5。由此可以看出,各类样地的土壤比水容量变化范围均较大。各林地土壤水势在  $-0.5 \times 10^5$  Pa,  $-3 \times 10^5$  Pa 及  $-10 \times 10^5$  Pa 左右为水容量变化的关键点。

表 5 林地土壤比水容量 ml/( $10^5$  Pa · g)

样地	土壤水势 ( $-10^5$ Pa)									
	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	3.0	5.0	10.0	15.0	20.0
侧柏林	$2.10 \times 10^{-1}$	$1.29 \times 10^{-1}$	$6.97 \times 10^{-2}$	$4.65 \times 10^{-2}$	$3.03 \times 10^{-2}$	$8.06 \times 10^{-3}$	$4.36 \times 10^{-3}$	$1.89 \times 10^{-3}$	$1.16 \times 10^{-3}$	$8.22 \times 10^{-4}$
油松 ×刺槐	$2.38 \times 10^{-1}$	$1.45 \times 10^{-1}$	$7.75 \times 10^{-2}$	$5.13 \times 10^{-2}$	$3.32 \times 10^{-2}$	$8.64 \times 10^{-3}$	$4.62 \times 10^{-3}$	$1.98 \times 10^{-3}$	$1.20 \times 10^{-3}$	$8.46 \times 10^{-4}$
刺槐	$2.75 \times 10^{-1}$	$1.65 \times 10^{-1}$	$8.60 \times 10^{-2}$	$5.61 \times 10^{-2}$	$3.57 \times 10^{-2}$	$8.84 \times 10^{-3}$	$4.62 \times 10^{-3}$	$1.91 \times 10^{-3}$	$1.14 \times 10^{-3}$	$7.94 \times 10^{-4}$
油松	$2.35 \times 10^{-1}$	$1.44 \times 10^{-1}$	$7.73 \times 10^{-2}$	$5.14 \times 10^{-2}$	$3.33 \times 10^{-2}$	$8.79 \times 10^{-3}$	$4.73 \times 10^{-3}$	$2.04 \times 10^{-3}$	$1.25 \times 10^{-3}$	$8.80 \times 10^{-4}$
刺槐 ×侧柏	$3.09 \times 10^{-1}$	$1.83 \times 10^{-1}$	$9.44 \times 10^{-2}$	$6.11 \times 10^{-2}$	$3.85 \times 10^{-2}$	$9.28 \times 10^{-3}$	$4.79 \times 10^{-3}$	$1.95 \times 10^{-3}$	$1.15 \times 10^{-3}$	$7.95 \times 10^{-4}$
天然林	$2.04 \times 10^{-1}$	$1.25 \times 10^{-1}$	$6.79 \times 10^{-2}$	$4.54 \times 10^{-2}$	$2.96 \times 10^{-2}$	$7.94 \times 10^{-3}$	$4.30 \times 10^{-3}$	$1.88 \times 10^{-3}$	$1.15 \times 10^{-3}$	$8.17 \times 10^{-4}$

将表 3 中的  $A \cdot B$  值与表 4 中的  $C$  进行比较,可以发现:水势一定时,土壤水容量随  $A \cdot B$  值增大而增加; $A \cdot B$  值越大,达到比水容量某数量级时的水势值就越小。所以值

$A \cdot B$  愈大,说明土壤的释水性能愈好。各林地相比,在同样的水势下,刺槐和侧柏混交林林地比水容重最大,以下依次为刺槐、油松、油松和刺槐混交林、侧柏与天然次生林。

3.3 土壤有效水动态分析

土壤水分状况是决定黄土区林草植被布局与配置的关键因素。根据土壤水分对植物生长有效性原理:当林地土壤水分无效水时,植物已不能从林地中吸收水分,植物生长就会受到抑制。在整个生长季森林植被不断蒸散耗水,同时大气降水又不断补充给林地,而林地土壤水分的亏损或盈余,即土壤水分为有效水或无效水以及无效水持续时间,直接影响着林分生长的稳定与否。

试验区不同林分在观测年份 2002 - 2003 年内生长季的土壤水分利用的有效性状况见图 2。

从图 2 分析,2003 丰水年试验区人工林中油松林、侧柏林、刺槐林、油松和刺槐混交林、侧柏和刺槐混交林林地的土壤水分在生长季大体都高于无效水的临界值,未出现土壤水

分亏损,林分生长稳定。2002 年贫水年,各林地土壤水分都出现过不能被植物吸收利用的时段,主要集中在 6 月和 9 月某一时段,但不能被吸收利用的时段占整个生长季比例较小,其中油松林、刺槐林、侧柏林、刺槐和侧柏混交林、天然次生林林地土壤水分利用状况好,大体都处在难效水临界值以上,因此林分生长也较稳定。

4 结 论

(1) 晋西黄土区主要造林树种的坡面林地中,土壤水分特征曲线可以用方程经验公式进行拟合,与式(4)表示相同, A 值 13 ~ 16, B 值 0.19 ~ 0.20。因此,就总体而言,本区人工林地的土壤持水力较高,土壤含水率随水势降低而递减的速度较慢。

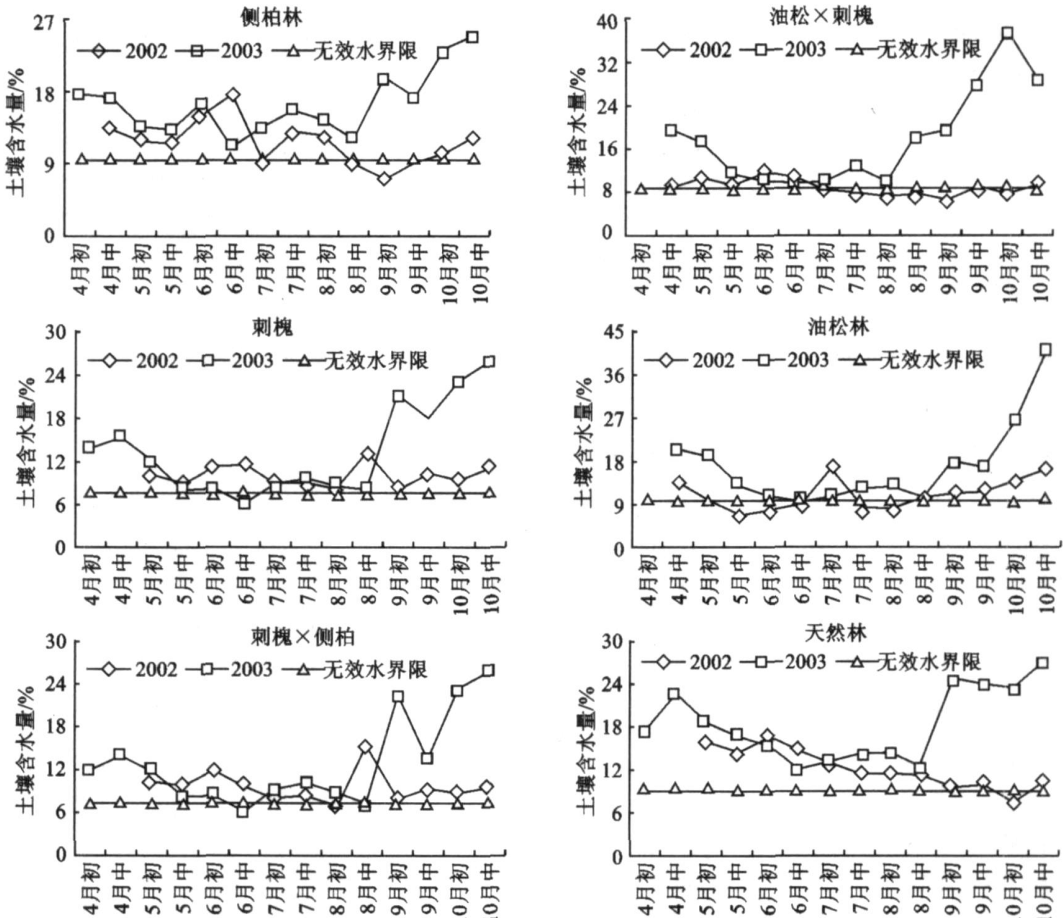


图 2 林分生长季内土壤水分的有效性

(2) 根据林地土壤水分特征曲线和比水容量,刺槐和侧柏混交林水分利用能力最强,有效水的范围为 7.214 % 以上,其次为刺槐纯林,有效水范围为 7.806 % 以上,以下为油松 × 刺槐、天然次生林、侧柏林、油松林。就潜在有效水范围来看,刺槐及其混交林水分的利用范围较大。

(3) 2003 年丰水年,坡面各林地土壤水分有效利用性大,土壤含水量在生长季都高于无效水临界值;2002 贫水年,各林地土壤水分都出现过不能利用时段,但所占时间短,其中油松林、刺槐林、侧柏林、刺槐和侧柏混交林、天然次生林林地土壤水分利用状况好,林地土壤水分可利用范围长,林分生长也较稳定。

参考文献:

[1] 张雷明,上官周平. 黄土高原土壤水分与植被生产力的

关系[J]. 干旱区研究, 2002, 19(1): 59-63.  
[2] 王华田,张光灿,刘霞. 论黄土丘陵区造林树种选择的原则[J]. 世界林业研究, 2001, 14(5): 74-78.  
[3] Fedick S L, Morrison B A. Ancient use and manipulation of landscape in the Yalahau region of the northern Maya low-lands[J]. Agriculture and Human Values, 2004, 21: 207-219.  
[4] 王力,邵明安,侯庆春. 土壤干层量化指标初探[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 87-90.  
[5] 杨文治,邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

(下转第 86 页)

度具有较好的适用性,且该方法简单易行,参数获取方便,值得在黄土区进一步推广应用。

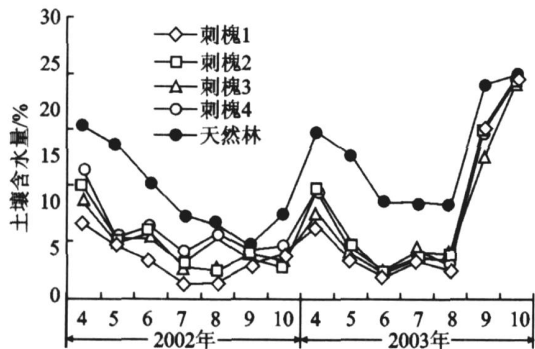


图 1 林龄 13 a 不同密度刺槐纯林土壤含水量变化

#### 4 结 论

(1)黄土丘陵沟壑区水土保持林合理林分密度的确定必须遵循“量水植树”的基本原则。依据水量平衡原理,在无地表径流,无土壤的深层渗漏,降水资源得以充分利用的情况下,林分在某一生长季内对降水资源的消耗量应小于或等于降水总量,根据上述原理分别计算了晋西黄土区蔡家川流域刺槐和油松林的合理林分密度取值。2 a 生刺槐林分密度应为 15 569 株/hm<sup>2</sup>,3 a 生刺槐林分密度应为 8 254 株/hm<sup>2</sup>,5 a 生刺槐林分密度应为 4 214 株/hm<sup>2</sup>,7 a 生刺槐林分密度应为 2 049 株/hm<sup>2</sup>,13 a 生刺槐林分密度应为 876 株/hm<sup>2</sup>;17~19 a 生油松林分密度应为 1 497 株/hm<sup>2</sup>,19~20 a 生油松林分密度应为 1 284 株/hm<sup>2</sup>,25~28 a 生油松林分密度应为 874 株/hm<sup>2</sup>。

(2)水分是黄土区生态重建和植被恢复的重要限制因子。在 2002 年和 2003 年连续 2 a 分别观测了生长季时段内林龄为 13 a 不同密度刺槐纯林和林龄为 17 a 不同密度油松纯林林地的土壤含水量动态变化,刺槐 4 和油松 3 的林分密度更适合其在黄土区健康生长,较少受到水分胁迫的影响。刺槐 4 的密度为 900 株/hm<sup>2</sup>,油松 3 的密度为 1 500 株/hm<sup>2</sup>,两者的密度与通过公式(1)计算得出的刺槐和油松的合理林分密度取值基本一致,说明应用公式(1)计算黄土区刺槐和油松的合理林分密度具有较好的适用性,且该方法简单易行,参数获取方便,值得在黄土区进一步推广应用。

#### 参考文献:

[1] 高加民,唐安亮.正确认识造林密度问题[J].林业勘查设计,2003,125(1):13.

得在黄土区进一步推广应用。

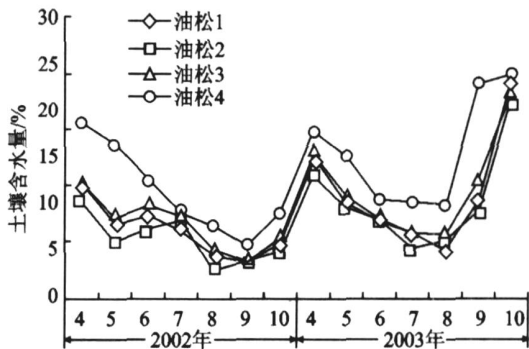


图 2 林龄 17 a 不同密度油松纯林土壤含水量变化

[2] 王迪生.关于林分密度研究[J].林业资源管理,1994(1):67-71.

[3] 张新海,黄启河,邵新建.谈造林密度的控制[J].黑龙江生态工程职业学院学报,2006,89(1):22.

[4] 吴立东,赵玉珍,王建华.影响造林密度的因素分析[J].林业勘查设计,2004,12(1):29.

[5] 张惠光.福建柏林分密度控制图的研究[J].福建林业科技,2006,33(4):41-44.

[6] 林小梅.闽东柳杉人工林林分密度控制图的研究[J].福建林业科技,2002,29(3):75-77.

[7] 林武星,叶功富,徐俊森,等.木麻黄防护林不同造林密度综合评价研究[J].防护林科技,2004,60(3):1-3.

[8] 盛炜彤.杉木林的密度管理与长期生产力研究[J].林业科学,2001,37(5):2-9.

[9] 叶功富,涂育合,林瑞荣,等.杉木人工林不同密度管理定向培育大径材[J].北华大学学报:自然科学版,2005,6(6):545-549.

[10] 陈东来,刘丽华,张景兰.林分密度的新指标-冠积指数[J].东北林业大学学报,2003,31(5):15-17.

[11] 陈光彩,郝士成,李怡,等.麻池背油松天然林林分生长结构的研究[J].山西林业科技,2004(4):10-13.

[12] 张彩琴,郝敦元,李海平.人工林林分密度最优控制策略的数学模型[J].东北林业大学学报,2006,34(2):24-26.

[13] 解开宏.广南县杉木人工林林分密度控制图的编制[J].林业调查规划,2006,31(3):37-41.

(上接第 82 页)

[6] 杨新民.黄土高原灌木林地水分环境特性研究[J].干旱区研究,2001,18(1):8-13.

[7] 刘发民,张应华,仵彦卿,等.黑河流域荒漠地区梭梭人工林地土壤水分动态研究[J].干旱区研究,2002,19(1):27-31.

[8] 吴文强,李吉跃,张志明,等.北京西山地区人工林土壤水分特征的研究[J].北京林业大学学报,2002,24(4):

51-55.

[9] 王孟本,李洪建.黄土高原人工林水分生态研究[M].北京:中国林业出版社,2001.

[10] 王孟本,柴宝峰,李洪建,等.黄土区人工林的土壤持水力与有效水状况[J].林业科学,1999,35(2):7-14.

[11] 张小泉,张清华,毕树峰.太行山北部中山幼林地土壤水分研究[J].林业科学,1994,30(3):193-200.