

黄土丘陵沟壑区林地水文生态效应

陈 杰¹, 刘文兆^{1,2,*}, 张勋昌³, 侯喜禄^{1,2}, 胡梦^{2,4}, 王 兵²

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;

3. USDA-ARS Grazinglands Research Laboratory, El Reno, Oklahoma 73036, USA;

4. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃兰州 730070)

摘要: 根据安塞水土保持试验站 1993~2002 年林地径流小区的降雨产流产沙的定位观测资料及 2002 年土壤含水量资料, 分析了不同树种对坡面尺度降雨产流产沙及土壤水分的影响。结果表明: 场降雨径流小区的产流量、产沙量与降雨量具有较好的相关性; 多元回归分析表明, 场降雨产流量和产沙量与降雨量和最大 30 min 雨强的乘积呈正相关, 与植被覆盖度呈负相关, 场降雨产沙量回归方程复相关系数为 0.253, 各处理场降雨产流量回归方程复相关系数的变化范围为 0.465~0.723, 均达到了极显著的水平 ($P < 0.01$)。同时, 各树种均具有良好的减流减沙功能, 与农地相比, 年均产流量和产沙量分别减少 4.8%~52.9% 和 26.8%~86.0%; 沙棘纯林及其混交林的减流减沙效益优于油松纯林。同时, 沙棘纯林及其各混交林在造林初期就表现出良好的减流减沙效益, 随着树龄的增长, 其作用更加明显; 而油松纯林在造林初期作用不明显, 甚至出现产流量和产沙量大于农地的现象, 但随着树龄的增长, 减流减沙作用逐渐呈现并增大。沙棘纯林及其混交林 30 cm 以下土壤含水量在整个生长季中均呈递减趋势, 生长季初 (4 月份) 土壤含水量最高, 而生长季末 (10 月份) 降到最低值。2002 年沙棘纯林的耗水深度为 220 cm, 而其混交林的耗水深度达到 300 cm。同时, 在整个生长季节中, 沙棘纯林及其混交林整个剖面平均土壤含水量存在着显著的差异, 表现为: 沙棘 > 杨树 > 沙棘 > 沙棘 > 油松。

关键词: 丘陵沟壑区; 林地; 水土保持; 土壤水分

文章编号: 1000-0933(2008)07-2954-10 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Hydro-ecological effects of woodland in the loess hilly-gullied region

CHEN Jie¹, LIU Wen-Zhao^{1,2,*}, ZHANG Xun-Chang³, HOU Xi-Lu^{1,2}, HU Meng-Jun⁴, WANG Bing²

1 College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

3 USDA-ARS Grazinglands Research Laboratory, El Reno, Oklahoma 73036, USA

4 College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 2954~2963

Abstract: Soil and water conservation benefits of different afforested trees in the loess hilly-gullied region were evaluated based on runoff and soil erosion measured in vegetated runoff plots between 1993 and 2002. Soil water conditions and their dynamics under forestation trees were also analyzed according to soil water content measured in 2002. Results showed that

基金项目: 国家自然科学基金国际合作与交流资助项目 (40640420061); 中国科学院海外杰出学者基金资助项目 (2005-2-3); “十一五” 国家科技支撑计划资助项目 (2006BAD09B09)

收稿日期: 2007-11-24; **修订日期:** 2008-04-01

作者简介: 陈杰 (1981~), 男, 湖南宁乡人, 硕士生, 主要从事流域水文生态研究. E-mail: chj092413@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author E-mail: wzliu@ms.iswc.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by the International Cooperation and Exchange Project of National Natural Science Foundation of China (No. 40640420061), the Outstanding Overseas Chinese Scholars Fund of Chinese Academy of Sciences (No. 2005-2-3) and the Eleventh Five-year Plan for Supporting Science and Technology of China (No. 2006BAD09B09)

Received date: 2007-11-24; **Accepted date:** 2008-04-01

Biography: CHEN Jie, Master candidate, mainly engaged in hydro-ecology in watershed. E-mail: chj092413@yahoo.com.cn

<http://www.ecologica.cn>

runoff and sediment were correlated with rainfall. Multiple regression analysis indicated that there was a positive correlation between runoff and the product of rainfall depth and maximum 0.5-hour rainfall intensity at the significant level of 0.01, as well as between sediment and the product of rainfall depth and maximum 0.5-hour rainfall intensity. However, both runoff and sediment were negatively correlated with vegetation cover. The multiple correlation coefficient ranged from 0.465 to 0.723 for runoff and was 0.253 for sediment. In addition, soil and water conservation benefits were reasonably evident for all afforested trees. Compared with farmland, runoff and sediment decreased to 4.8%–52.9% and 26.8%–86.0%, respectively. The soil and water conservation benefits of *Hippophae rhamnoides* and its mixtures were greater than those of *Pinus tabulaeformis* whose cover was poor in the early growth years, during which runoff and sediment were even greater than those of farmland. But the benefits increased as the trees grew. However, the soil and water conservation benefits of *Hippophae rhamnoides* and its mixtures were good even in the early growing years and became even better as trees grew over time in eleven years. Soil water content below 30 cm soil layer under the *Hippophae rhamnoides* and its mixtures decreased during the entire growing season, being highest in April and lowest in October. Water consumption depths of the *Hippophae rhamnoides* under monoculture and biculture were 220 and 300 cm, respectively, in 2002. There were significant differences in soil water content for mono-species of *Hippophae rhamnoides* and its binary mixtures during the entire growing season. The tree species, in terms of soil water content, ranked in the ascendant order of *Hippophae rhamnoides*-*Populus simonii* Carr mixture, *Hippophae rhamnoides*, and *Hippophae rhamnoides*-*Pinus tabulaeformis* mixture.

Key Words: less hilly-gullied region; woodland; soil and water conservation; soil water content

黄土高原水土流失严重闻名于世,造成水土流失的原因除地形、土壤、降雨外,植被破坏也是一个重要原因^[1, 2]。人类活动对森林的破坏,特别是对山区森林的砍伐,破坏了原有坡地的相对稳定,引起严重的水土流失^[3~5],给当地的生产和生态环境造成了严重的影响。一般认为,治理水土流失应采取工程措施、生物措施和耕作措施相结合的方法,其中植被建设是治理水土流失和改善生态环境的根本措施^[6]。植被具有拦蓄降雨、减少径流、固持土壤、防止侵蚀、改良土壤、改善生态环境等作用^[7],因此植被对径流和输沙的影响成为黄土高原生态环境问题研究的核心^[8~11]。然而黄土高原特殊的自然条件,使造林成活率很低,保存率更低。干旱年土壤水分以耗散为主,土壤储水量处于负补偿,入渗雨量全为强烈的蒸发蒸腾作用所消耗^[12]。多年研究已经发现黄土高原人工林在幼龄期生长基本正常,但8~10a后人工林就出现干梢、矮小、枯死等生长不良的状况^[13, 14]。树种结构搭配不合理、土壤水分不足是导致这种状况的重要原因,特别是在2~4m深处土壤干层的出现^[15],而土壤干层的干燥强度因植物种类和生长年限不同而有差异^[16, 17],因此研究该地区不同植被的水文生态效应,可为有针对性地防治水土流失、实施流域管理、植树造林中树种的选择等提供科学依据。

本研究通过对安塞墩山林地径流小区不同土地利用及造林方式下场降雨产流产沙量长达10a(1993~2002年)的监测数据进行分析,以及对11龄沙棘纯林及其混交林整个生长季土壤含水量的测定,旨在进一步探讨林地植被类型、覆盖度、降雨与地表径流和侵蚀产沙之间的关系,不同造林方式对剖面土壤水分分布的影响以及季节动态,为该区合理的进行植被恢复和建设,防治水土流失提供理论基础和科学依据。

1 研究地区概况

本研究所在地安塞水土保持综合试验站位于黄土高原中部的陕西省延安市安塞县城郊,北纬36°51'30",东经109°19'23",属黄土丘陵沟壑区第二副区,境内切割破碎,丘陵起伏,沟壑密度4.7 km·km⁻²。海拔高度1068~1309 m。年均气温8.8℃,年平均降雨量531.3 mm,在气候上处于暖温带半湿润向半干旱过渡区;主要土壤为黄绵土,占总面积的88.4%,地带性土壤为黑垆土;植被类型处于暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原区,同时又是典型受人类活动影响的水土流失严重区。

2 试验方法

2.1 径流小区的布设

试验共设径流小区共有12个,小区坡度分别为24°和27°,垂直投影面积为100 m²(矩形长20 m,宽5

m),小区边界都用预制钢筋混凝土挡板埋砌而成,上方设截水沟,下部有积水槽、集流桶和分流桶相连。树种于1992年栽植,径流小区共设6个处理:农地(对照)、荒坡、油松、沙棘、沙棘×油松和沙棘×杨树,每个处理设两个重复。其中农地1993~1998年种植谷子,1999与2000年种植糜子,2001与2002年没有种植作物,地表已有杂草生长,但其植被覆盖度小于荒坡。林草植被径流小区基本情况见表1。

表1 林草植被径流小区基本情况(1999.10.05)

Table 1 General conditions of vegetated runoff plots (1999.10.05)

土地与植被类型 Land and vegetation types	坡度 Slope (°)	株行距 Spacing (m)	混交林树种 Species of mixture	平均株高 Average height (cm)	平均地径 Average ground diameter (cm)	覆盖度 Coverage (%)
农地 Farm land	24	-	-	40	-	34~40
荒坡 Uncultivated slope-land	24	-	-	40	-	30~60
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	27	1.5 × 1.5	-	75	2.58	20~35
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	24	1.5 × 1.5	-	340	5.41	70~90
沙棘 × 杨树 <i>H. rhamnoides</i> & <i>P. simonii Carr</i>	24	1.5 × 1.0	沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	220	3.84	70~80
			杨树 <i>P. simonii Carr</i>	380	20.00	
沙棘 × 油松 <i>H. rhamnoides</i> & <i>P. tabulaeformis</i>	27	1.5 × 1.0	沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	190	3.62	60~65
			油松 <i>P. tabulaeformis</i>	98	2.83	

2.2 观测项目与方法

径流量测定方法为,采取雨后测量径流桶内水深,然后乘以径流桶底面积计算得出;产沙量测定方法为:首先将径流桶中泥水搅拌均匀后取泥水样(1000 ml),过滤、烘干泥样并称重,然后根据径流量等折算出侵蚀模数;同时,2002年4~10月每月的14日采用打钻取土烘干法测定各小区的土壤质量含水量,测定深度为0~500 cm,其中0~100 cm为每10 cm测定1次,100 cm以下每20 cm测定1次,测定位置为各小区中央,树种之间的空地。

2.3 数据统计分析

采用SPSS统计分析软件进行成对t检验和多元回归分析。

3 结果分析

3.1 不同土地利用及造林方式的场降雨减流减沙效益

1993~2002年的38场产流的降雨中(图1)各径流小区产流产沙观测结果见图2。图1与图2中横坐标的场降雨事件均按照时间先后顺序排列。场降雨径流小区的产流量和产沙量与降雨量有较好的相关关系,即降雨量大,产流与产沙量也较大,同时产流与产沙量的大小表现出基本相一致的规律。但这些规律不是绝对的,比如1996年7月26日的降雨(图1中第20次降雨)在38次降雨中降雨量最大,达105.4 mm,但产流和产沙量均不是该时段的最大值。

随着林木的生长,减流减沙效益逐渐明显,即在一定年限内,相同或相似的场降雨条件下,随着树龄的增长,产流量和侵蚀模数逐渐减小。以1993-07-26和1998-07-31

两场降雨为例,这两次降雨的降水量分别为10.8 mm和11.0 mm,降雨强度分别为0.34 mm·min⁻¹和0.36 mm·min⁻¹,降雨量和降雨强度差异很小,但沙棘林的产流量和侵蚀模数却有显著的差异,产流量分别为15.

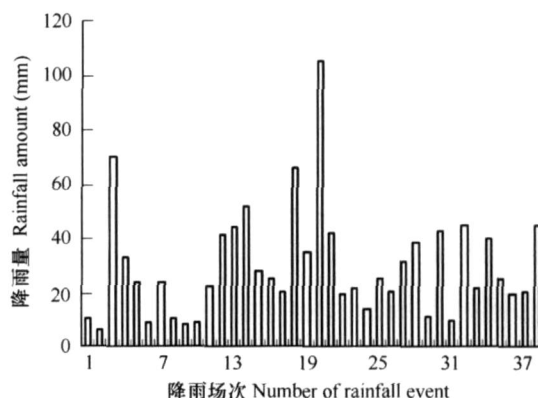


图1 1993~2002年38场降雨降雨量

Fig. 1 Rainfall amount of individual events between 1993 and 2002

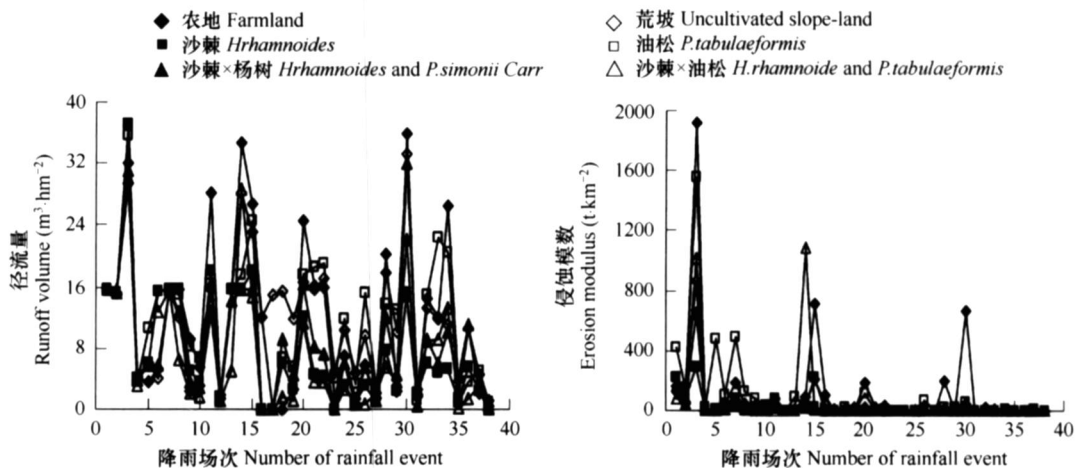


图 2 1993~2002年各径流小区场降雨产流和产沙量对照

Fig 2 Runoff and sediment of individual precipitation events for each treatment between 1993 and 2002

$48 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $2.40 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 侵蚀模数分别为 $222.74 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 和 $0 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 其他树种也具有相类似的结果。这主要是由于随着林木的生长, 林分郁闭度增大, 地上枯枝落叶物增加, 起到了拦蓄降雨, 固持土壤的作用。

表 2 径流小区产流特性回归分析 ($n = 30$)Table 2 Regression analysis of runoff from the plots ($n = 30$)

土地与植被类型 Land and vegetation types	产流量回归方程 Regression equation of runoff	回归分析的 F 检验 F test for ANOVA of regression analysis		复相关系数 Multiple correlation coefficient
		F	Sig	
农地 Farmland	$Q = 0.404PI_{30} + 6.892$	24.3	0.000	$R^2 = 0.465$
荒坡 Uncultivated slope-land	$Q = 0.271PI_{30} - 0.375C + 21.323$	12.6	0.000	$R^2 = 0.482$
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	$Q = 0.239PI_{30} - 0.451C + 16.639$	9.9	0.001	$R^2 = 0.605$
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	$Q = 0.161PI_{30} - 0.134C + 12.472$	19.1	0.000	$R^2 = 0.595$
沙棘 × 杨树 <i>H. rhamnoides</i> & <i>P. simonii</i> Carr	$Q = 0.250PI_{30} - 0.098C + 9.725$	15.6	0.000	$R^2 = 0.545$
沙棘 × 油松 <i>H. rhamnoides</i> & <i>P. tabulaeformis</i>	$Q = 0.285PI_{30} - 0.167C + 11.808$	34.0	0.000	$R^2 = 0.723$

场降雨产流产沙量同时受降雨量、雨强、植被覆盖度等因素的影响。为了定量地分析降雨、植被覆盖度等因素对产流产沙量的影响, 本研究中采用降雨量 (P, mm) 和最大 30min 雨强 ($I_{30}, \text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) 的乘积 (PI_{30}) 作为侵蚀性降雨的指标, 对场降雨产流量 ($Q, \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) 与 PI_{30} 和小区植被覆盖度 (包括郁闭度和活地被物盖度, C) 进行多元回归分析 (表 2)。1993~2002 年间所发生的 38 次侵蚀性降雨中仅有 30 次记录了 30 min 的降雨强度, 因此回归方程样本值为 30。农地由于多年覆盖度没有太大的差异, 仅求出了产流量与 PI_{30} 的回归方程。所有方程显著性检验的 P 值均小于 0.01, 表明所建立的回归方程是有效的; 由方程可以看出, 场降雨产流量与 PI_{30} 和植被覆盖度均呈良好的相关关系。产流量与 PI_{30} 呈正相关, 即随着 PI_{30} 的增大, 产流量增加; 除农地外各处理产流量与植被覆盖度呈负相关, 即在一定范围内随着植被覆盖度的增大, 产流量减小。

由于有多次降雨产流但没有产沙, 各处理产沙次数相对较少, 因此没有分别计算各处理产沙量的回归方程, 仅计算了所有处理总的产沙量回归方程 (方程 (1))。为了客观地反映降雨及植被覆盖度对产沙的影响, 求方程时剔除了产沙量为 0 的点。由方程 (1) 可以看出, 产沙量 ($S, \text{t} \cdot \text{km}^{-2}$) 与产流量具有相类似的规律, 即产沙量与 PI_{30} 呈正相关, 与植被覆盖度呈负相关。

$$S = 7.324PI_{30} - 4.071C + 100.257 (n = 120, R^2 = 0.253, F = 20.0, \text{sig} = 0.000) \quad (1)$$

3.2 不同土地利用及造林方式的减流减沙效益年动态

表 3 中农地产流量为实测值,而其它处理下数值为各处理产流量与农地产流量的比值。多年平均产流量大小顺序为:沙棘 > 油松 < 沙棘 < 沙棘 > 杨树 < 油松 < 农地 < 荒坡,可以看出,与农地相比,各树种均具有较好的减流效益。对各处理年径流量之间进行成对 t 检验(表 4 中上三角部分)可以看出:荒坡地、油松林地与农地径流量之间没有显著的差异;而与农地相比,沙棘纯林及其混交林能显著的减少地表径流。这主要由于沙棘林分长势良好,地上很快就形成较厚的枯落物,林地产生径流的机会很小,而油松林生长缓慢,长势较差,郁闭度较低,地上枯枝落叶物也较少,因此减流的能力远差于沙棘林;荒坡地由于植被稀疏,长势较差,地表枯落物很少,因此地表径流较大。据侯喜禄等^[18]在 1994 年的一次降雨中的测定可知,沙棘林土壤稳渗率为 $1.54 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,农地为 $0.918 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,荒坡地为 $0.790 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。沙棘林地的土壤入渗性能明显优于农地和荒坡,更有利于降雨的下渗,荒坡地由于有土壤结皮的形成,影响了土壤水分入渗,因此其地表径流高于农地。

表 3 1993~2002 年不同树种及造林方式下产流量比较^[a]

Table 3 Runoff from different tree species and cultures from 1993 to 2002

年份 Year	汛期降雨量 Rainfall in Flood Season (mm)	农地(对照) Fam land (control)	荒坡 Uncultivated slope-land	2~11 龄油松 2~11a <i>P. tabulaeformis</i>	2~11 龄沙棘 2~11a <i>H. rhamnoides</i>	2~11 龄沙棘 > 油松 2~11a <i>H. rhamnoides</i> & <i>P. tabulaeformis</i>	2~11 龄沙棘 > 杨树 2~11a <i>H. rhamnoides</i> & <i>P. sinonii Carr</i>
1993	348.9	70.00	1.03	1.00	1.11	0.70	1.05
1994	259.1	128.24	0.81	0.90	0.88	0.63	0.73
1995	269.1	38.78	1.31	1.03	0.46	0.38	0.61
1996	398.0	59.20	1.55	1.26	0.60	0.39	0.92
1997	177.6	10.05	2.00	1.91	0.40	0.35	0.69
1998	247.2	33.46	1.40	0.91	0.49	0.36	0.74
1999	200.2	35.91	0.93	0.90	0.26	0.42	0.62
2000	168.2	53.46	0.61	0.51	0	0	0
2001	351.1	67.56	0.76	0.94	0.37	0.53	0.61
2002	212.0	5.73	0.45	1.05	0.40	0.57	0.44
平均 Mean	263.1	50.24	1.01	0.95	0.60	0.47	0.68

[a] 农地产流量以每公顷所产流的体积表示 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$),汛期降雨量即 7~9 月份的降雨量 Runoff from famland is denoted by runoff volume per hectare ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$); rainfall in flood season is total rainfall amount between July and September

表 4 1993~2002 年不同树种及造林方式径流量与侵蚀量之间成对 t 检验 P 值

Table 4 P values of paired-samples t test for runoff and sediment under different tree species and cultures from 1993 to 2002

项目 Items	农地 Fam land	荒坡 Uncultivated slope-land	油松 <i>P. tabulaeformis</i>	沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	沙棘 > 油松 <i>H. rhamnoides</i> & <i>P. tabulaeformis</i>	沙棘 > 杨树 <i>H. rhamnoides</i> & <i>P. sinonii Carr</i>
农地 Fam land		0.960	0.521	0.006**	0.001**	0.019*
荒坡 Uncultivated slope-land	0.014*		0.426	0.011*	0.001**	0.004**
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	0.404	0.163		0.005**	<0.001**	0.002**
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	0.017*	0.097	0.049*		0.186	0.245
沙棘 > 油松 <i>H. rhamnoides</i> & <i>P. tabulaeformis</i>	0.013*	0.062	0.044*	0.348		0.010*
沙棘 > 杨树 <i>H. rhamnoides</i> & <i>P. sinonii Carr</i>	0.012*	0.027*	0.047*	0.532	0.209	

*表示有显著差异 denotes significant difference; **表示有极显著差异 denotes extremely significant difference

同时,沙棘纯林及其各混交林在造林初期就表现出良好的减流效益,随着树龄的增长,作用更加明显;而油松纯林在造林初期减流作用不明显,甚至出现产流量大于农地的现象,但随着树龄的增长,逐渐出现减流作

用(表3)。吴钦孝等^[19]研究表明,适宜的郁闭度(覆盖度),一定的枯枝落叶层厚度和相应的根密度是林草植被保持水土的重要前提。由于沙棘及其混交林长势良好,在2~3a就基本郁闭,地上枯枝落叶物很快积累,起到了良好的减流作用;而油松林在造林初期这些条件均没有满足,因此减流作用较差;随着林木的生长,各条件逐渐满足后才表现出较好的减流效益。

表5 1993~2002不同树种及造林方式下土壤侵蚀模数($t \cdot km^{-2}$)比较Table 5 Soil erosion modulus ($t \cdot km^{-2}$) for different tree species and cultures between 1993 and 2002

年份 Year	汛期降雨量 Rainfall in flood season (mm)	农地(对照) Farm land (control)	荒坡 Uncultivated slope-land	2~11龄油松	2~11龄沙棘	2~11 龄沙棘-油松	2~11 龄沙棘-杨树
				2~11a <i>P. tabulaeformis</i>	2~11a <i>H. rhamnoides</i>	2~11a <i>H. rhamnoides</i> & <i>P. tabulaeformis</i>	2~11a <i>H. rhamnoides</i> & <i>P. sinonii Carr</i>
1993	348.9	2137.53	0.56	1.01	0.28	0.52	0.41
1994	259.1	526.98	0.25	2.91	0.42	0.33	0.22
1995	269.1	812.74	0.35	0.30	0.02	0.02	0.03
1996	398.0	215.56	0.46	0.69	0.01	0.07	0.09
1997	177.6	0	-	-	-	-	-
1998	247.2	205.12	0.14	0.55	0	0	0
1999	200.2	672.28	0.07	0.03	0	0.05	0.01
2000	168.2	1434.55	0.12	0.13	0	0	0
2001	351.1	41.97	0.59	0.46	0.09	0.09	0.08
2002	212.0	14.09	0.36	0.92	0.10	0.67	0
平均 Mean	263.1	606.08	0.33	0.73	0.14	0.23	0.17

表5中农地侵蚀模数为实测值,而其它处理的数值为各处理侵蚀模数与农地侵蚀模数之比。年平均土壤侵蚀模数大小顺序为:沙棘<沙棘-杨树<沙棘-油松<荒坡<油松<农地。对各处理年侵蚀模数之间进行成对t检验(表4中下三角部分),可以看出,油松林地与农地之间没有显著的差异;与农地相比,荒坡地、沙棘纯林及其混交林能显著减少侵蚀量。农地虽然在减少径流方面优于荒坡,但其径流中的泥沙含量显著高于荒坡。主要由于耕作,农地表土疏松,土壤结构被破坏,加之其覆盖度小,无地被物覆盖,因而土壤颗粒容易被雨滴溅起,被径流搬运;而荒坡地表土壤紧实,活地被物根系及地表结皮有固结土壤的作用,抗冲性能好于农地,所以产沙量较农地小。林分的结构和种类不同,减沙效益也有很大差异,在该区长势良好的沙棘林减沙作用非常突出。这主要是由于沙棘生长较快,林分很快便能郁闭,根系生长也较快,由于林冠、地被物和根系的协同作用,减沙效益显著;而油松为针叶树种,生长缓慢,并且其枯枝落叶较少,较多土壤裸露,因此土壤流失也较严重。

同时,沙棘纯林及其各混交林在造林初期就表现出良好的减沙效益,随着树龄的增长,减沙效益更加明显,出现多年有径流但没有土壤流失的情况;而油松纯林在造林初期没有明显的减沙效果,甚至出现产沙量大于农地的现象,但随着树龄的增长,逐渐出现减沙效益。这主要是由各树种生长速度、生长状况、覆盖度以及地表枯枝落叶物的差异所引起的。

3.3 沙棘纯林及其混交林下土壤水分动态

由以上对不同树种减流减沙效益的研究可知,沙棘纯林及其混交林的减流减沙效益均较好,为了进一步探讨其土壤水分状况,2002年4~10月每月的14日采用烘干法测定了各小区0~500cm剖面的土壤质量含水量。

图3为沙棘纯林及其混交林土壤剖面水分的季节变化。可以看出,在整个生长过程中表层(0~30cm)土壤含水量没有明显的增减趋势,主要是由于降雨对土壤水分的补充主要影响表层土壤含水量,降雨入渗、产流均具有滞后性,同时地表蒸发以消耗表层土壤含水量为主,因此该层表现出更为复杂的水文过程。30cm以下土壤含水量在整个生长季中均呈递减趋势,生长季初(4月份)土壤含水量最高,而生长季末(10月份)降

到最低值。4月份之前,由于地面温度较低,土壤蒸发缓慢,而植物在这一时段之前处于生长停滞期,对土壤水分的消耗较少,因此沙棘纯林 30~220 cm 土层以上,混交林 30~300 cm 土层以上土壤含水量要明显高于其他月份。4月份沙棘进入生长期,随着沙棘的生长以及气温的不断上升,地面蒸发日益加强,植物蒸腾日渐旺盛,降水入渗后很快就被地面蒸发以及植物蒸腾所消耗,所以土壤含水量一直呈递减的趋势。从图中可以看出,4~6月份沙棘纯林,沙棘×油松、沙棘×杨树混交林的耗水深度分别为 120 cm、180 cm 和 220 cm;6~8 月份其耗水深度分别为 200 cm、300 cm 和 300 cm;8~10 月份分别为 220 cm、300 cm 和 300 cm,混交林 8~10 月份土壤水分消耗没有继续向土壤深层延伸,而以消耗 300 cm 以上的土壤水分为主。从整个生长季土壤含水量来看沙棘纯林的耗水深度为 220 cm,而混交林达到 300 cm,纯林和混交林之间耗水深度有着明显的差异,这可能是由于混交林中不同树种根系之间的竞争所引起的。

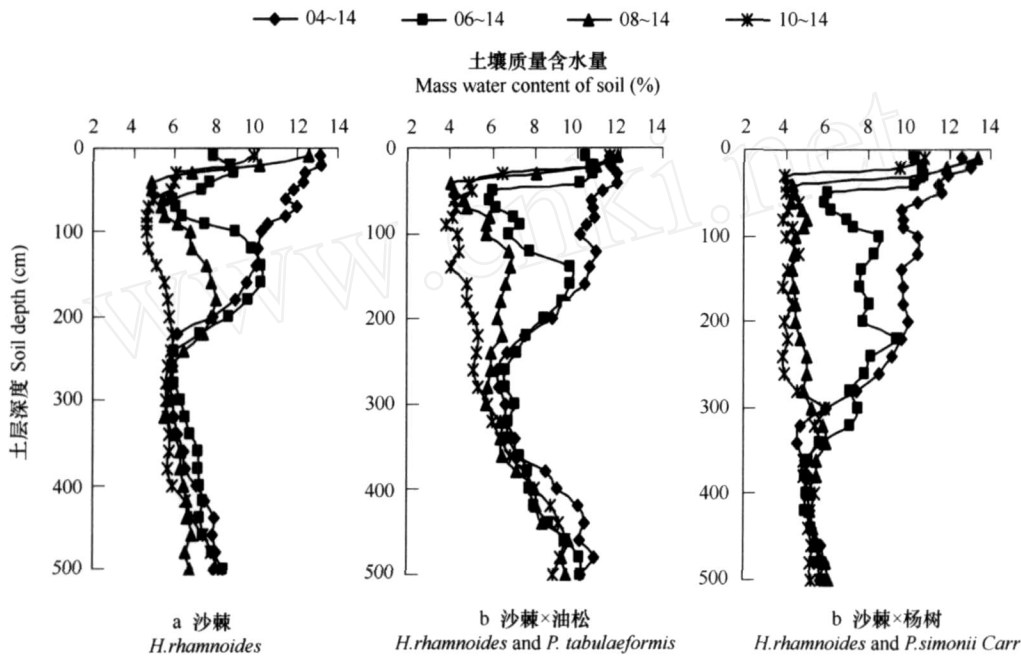


图 3 沙棘纯林及其混交林土壤剖面水分季节变化

Fig 3 Seasonal changes of soil water content under *Hippophae rhamnoides* and its mixtures

5~8 月份为各树种耗水旺期 (图 4),主要是由于 5~8 月份该地区气温较高,树木蒸腾和地表蒸发较剧烈。5 月份沙棘纯林及其混交林的土壤含水量差异不大,而后便出现明显的差异,5~8 月份沙棘×杨树混交林消耗土壤水分最多,整个剖面平均土壤含水量降低了 2.51%,主要由于该时期沙棘、杨树均生长旺盛,同时阔叶树种杨树蒸腾作用剧烈。而沙棘×油松混交林 5~7 月份耗水较少,平均土壤含水量仅降低了 0.57%,而 7~8 月份剧烈地消耗土壤水分,平均土壤含水量降低了 1.08%,沙棘纯林 5~8 月份耗水量较均匀,平均土壤含水量降低了 1.54%;沙棘纯林及其混交林 8~9 月份耗水量相对较小,而 9~10 月份耗水略有增加,主要由于 2002 年 8~9 月份降水量较多,达到了 64.6 mm,而 9~10 月份降水量相对较少,仅有 34.9 mm。在整个生长季节中,沙棘×杨树混交

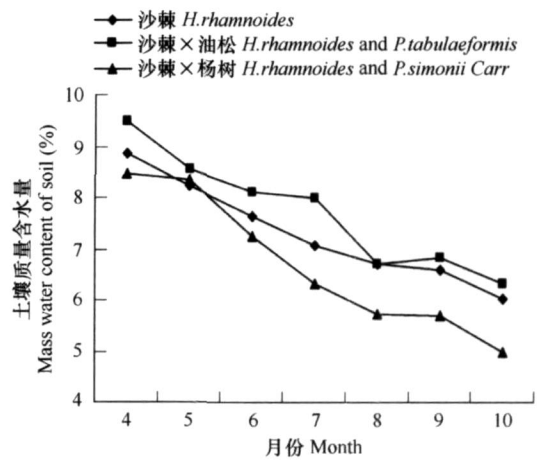


图 4 沙棘纯林及其混交林土壤水分月变化

Fig 4 Seasonal changes of soil water content under *Hippophae rhamnoides* and its mixture

林整个 5 m 剖面土壤平均含水量最低,沙棘纯林次之,沙棘 × 油松混交林较高(图 4),成对 *t* 检验表明,三者之间差异极显著 ($p < 0.01$)。虽然沙棘纯林及其混交林 2002 年耗水深度分别为 220 cm 和 300 cm,但 300 cm 土层以下纯林及其不同混交林土壤含水量之间仍有较大的差异,沙棘纯林 220 cm 土层以下 4 个月的土壤平均含水量为 6.50%,沙棘 × 油松、沙棘 × 杨树混交林 300 cm 土层以下分别为 8.45%、5.34%,这可能是由于往年林份对土壤水分消耗的差异引起的。由于沙棘 × 油松混交林中油松长势较弱,植株矮小,土壤水分的消耗主要以沙棘为主,而其中沙棘的相对数量也较沙棘纯林中沙棘的数量少,因此深层土壤水分也消耗较少;而沙棘 × 杨树混交林杨树长势较好,属于阔叶林,蒸腾作用强烈,不同树种根系对土壤水分的竞争,导致了 300 cm 土层以下土壤含水量较低。

4 结论与讨论

4.1 场降雨量、降雨强度、植被覆盖度与产流产沙量的关系

场降雨径流小区的产流和产沙量与降雨有较好的相关关系。多元回归分析表明,场降雨产流量和产沙量与降雨量和最大 30 min 雨强的乘积呈正相关,与植被覆盖度呈负相关;场降雨产沙量回归方程复相关系数 (R^2) 为 0.253,各处理场降雨产流量回归方程 R^2 的变化范围分别为 0.465 ~ 0.723,均达到了极显著的水平 ($p < 0.01$)。这与李怀恩等、张晓明等分别对黄土丘陵区的向阳沟小流域和山西省吉县蔡家川小流域径流小区的研究结论相一致^[20, 21];侯喜禄等的研究也表明,林地侵蚀量与覆盖度呈二次多项式的关系,覆盖度增大,林地径流量减小^[22]。综合以上研究结果表明,在降雨量及降雨强度一定的前提下,植被因子是影响径流和土壤侵蚀的敏感性因子,具有从根本上治理水土流失的作用,不论是高大的乔木还是低矮的灌木或草本,只有达到一定的群落覆盖度才能起到良好的水土保持作用。因此,植树造林,增加地表覆盖度,是防治黄土高原水土流失的重要举措。

4.2 不同土地利用及造林方式的减流减沙效益

不同土地利用方式、不同树种及混交种植方式的减流减沙效益差异较大。农地由于人为耕作的影响,表土较荒坡疏松,在减少径流方面优于荒坡,但其易遭侵蚀,径流的携沙量大,抵抗土壤侵蚀的能力远低于荒坡和林地;荒坡植被主要为多年生草本,加之地表有结皮的形成,虽在减少径流的作用上弱于农地和林地,但其减沙效益优于农地;综合而言,林地不论是在减流还是减沙方面,均显示出突出作用,与农地相比,年均产流量和产沙量分别减少 4.8% ~ 52.9% 和 26.8% ~ 86.0%;但不同树种、结构的林分,其减少径流和泥沙的作用也有较大差异。油松纯林在幼龄阶段生长缓慢,郁闭度低,其发挥的减流减沙效益也相应较低;和油松同年栽植的沙棘,其郁闭速度快,林分结构发育良好,显示出良好的水土保持效益。就混交模式而言,沙棘 × 杨树混交林产流量高于沙棘 × 油松混交林,但其产沙量较低。陈云明等利用该地区 1999 年径流小区的产流和产沙数据对比了农地、荒坡和不同树种的减流减沙效益,得出了相类似的结论^[6]。侯喜禄等在黄土丘陵沟壑区的研究表明,不同树种均有不同程度的减流减沙效益,2 ~ 6 龄沙棘纯林的减沙效益较好,2 ~ 6 龄沙棘 × 杨树混交林和沙棘 × 油松混交林的减沙效益差于沙棘纯林,这与本研究得出的结论基本一致^[22]。但本研究中沙棘 × 杨树混交林和沙棘 × 油松混交林的减沙效益要明显优于侯喜禄等所研究的^[22],主要是由于本研究中林分为 2 ~ 11 龄,随着林龄的增加,森林生态系统逐渐形成,活地被物盖度和地表枯枝落叶层也相应增加,因此,具有更好的减流减沙效益;特别是油松纯林在造林初期减流减沙作用很小,甚至出现产流量和产沙量大于农地的现象,但随着林龄的增长,减流减沙作用逐渐明显。因此,在黄土高原造林种草中,选择适宜的树种、混交模式,保持合理的林分结构和覆盖度是提高植被水土保持效益的关键。

4.3 沙棘纯林及其混交林土壤水分动态

土壤水分是黄土丘陵沟壑区沙棘生长的主要限制因素,土壤水分条件的好坏,直接影响着沙棘的生长状况^[23]。沙棘纯林及其混交林在整个生长过程中表层 (0 ~ 30 cm) 土壤含水量没有明显的增减趋势,表现出更为复杂的水文过程;30 cm 以下土壤含水量在整个生长季中均呈递减趋势,生长季初 (4 月份) 土壤含水量最高,而生长季末 (10 月份) 降到最低值;2002 年沙棘纯林的耗水深度为 220 cm,而其混交林耗水深度达到 300

cm;混交林的耗水深度明显高于纯林,这可能是由于混交林中不同树种根系对土壤水分的竞争所引起的。同时,在整个生长季节中,沙棘纯林及其混交林整个剖面平均土壤含水量存在着极显著的差异,含水量由低到高的顺序为:沙棘 > 杨树混交林 > 沙棘纯林 > 沙棘 > 油松混交林。从该区的树种(特别是沙棘)生长来看,长势良好,并未受到严重的水分胁迫,说明该区的水分条件基本可以满足树种生长的需要。但随着树龄的增长,土壤水分亏缺是否会成为树种生长的限制性因素还需做进一步的研究。

References:

- [1] Liu L C, Dong X F, Wang J H. Dynamic analysis of eco-environmental changes based on remote sensing and geographic information system: an example in Longdong region of the Chinese Loess Plateau. *Environ Geol*, 2007, 53: 589-598.
- [2] Tian J L, Liu P L, Shimizu H, *et al*. A case study on combating desertification at a small watershed in the hills-gully area of loess plateau, China. In: *Plant Responses to Air Pollution and Global Change*. Tokyo: Springer Japan, 2005, 277-284.
- [3] Yu J J, Liu C M. A Summary of research on forest hydrology. *Geographical Research*, 1989, 8 (1): 88-98.
- [4] Meng Q M. *Soil erosion on the Loess Plateau*. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 1996.
- [5] He X B, Zhou J, Zhang X B, *et al*. Soil erosion response to climatic change and human activity during the Quaternary on the Loess Plateau, China. *Reg Environ Change*, 2006, 6: 62-70.
- [6] Chen Y M, Hou X L, Liu W Z. Soil and water conservation function and ecology benefits of different types vegetation in semi-arid loess hilly region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14 (3): 57-61.
- [7] Dai L Y, Cai J B, Wang H L. The position and role of vegetation construction in ecological environment construction in the Loess Plateau. *The Journal of Northwest Agricultural University*, 2000, 28 (6): 130-134.
- [8] Chen Y M, Liu G B, Hou X L. Ecological benefits of artificial *seabuckthorn* stands in semi-arid hilly region of the Loess Plateau and soil and water conservation and soil moisture. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13 (11): 1389-1393.
- [9] Wang K Q, Wang B R. Study on thinning to *Robinia pseudoacacia* forest on the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13 (1): 11-15.
- [10] Wang Z L, Wang Y Y, Huang X H, *et al*. Soil erosion process research of the loess bare slope. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11 (4): 84-87.
- [11] Zhang X S, Hao H H, Zhang J Y. Study on effect of uncertainty in spatial distribution of rainfall on runoff and sediment modeling. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11 (1): 9-12.
- [12] Chen H S, Shao M A, Wan K L. Desiccation of deep soil layer and soil water cycle characteristics on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (10): 2491-2498.
- [13] Yang W X. The preliminary discussion on soil desiccation of artificial vegetation in the northern regions of China. *Scientia Silvae Sinicae*, 1996, 32 (1): 78-85.
- [14] Hou Q C. The distribution and growth nature of the small older-tree. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 1 (1): 64-72.
- [15] Zhao J B, Zhou Q, Hou Y J. Effect of dried layer of soil ecological environmental reconstruction. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2003, 31 (4): 93-97.
- [16] Li Y S. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16 (5): 427-432.
- [17] Li Y S. The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 3 (2): 91-101.
- [18] Hou X L, Bai G S, Cao Q Y. Study on benefits of soil and water conservation of forest and its mechanism in loess hilly region. *Research of Soil and Water Conservation*, 1996, 3 (2): 98-103.
- [19] Wu Q X, Zhao H Y, Liu X D. *Protective forest system construction and soil and water conservation in middle Yellow River*. Xi'an: Northwest University Press, 2000.
- [20] Li H E, Zhao J, Wang Q H, *et al*. Hydrological effects of vegetation change in loess slope and small watershed. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2004, 23 (6): 98-102.
- [21] Zhang X M, Yu X X, Wu S H, *et al*. Effects of forest vegetation on runoff and sediment production on sloping lands of Loess area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (9): 1613-1617.
- [22] Hou X L, Cao Q Y, Bai G S. Soil and water conservation benefits of different forest types in the Loess Region of northern Shaanxi. *Journal of Northwest Forestry College*, 1994, 9 (2): 20-24.

[23] Li K R, Wang Y M. The comprehensive management and its benefits of the gully region on the Loess Plateau. Chinese Forestry Press, 1990.

参考文献:

- [3] 于静洁, 刘昌明. 森林水文研究综述. 地理研究, 1989, 8 (1): 88~98.
- [4] 孟庆枚. 黄土高原水土保持. 郑州:黄河水利出版社, 1996.
- [6] 陈云明, 侯喜禄, 刘文兆. 黄土丘陵半干旱区不同类型植被水土保持生态效益研究. 水土保持学报, 2000, 14 (3): 57~61.
- [7] 代亚丽, 蔡江碧, 王宏丽. 植被建设在黄土高原生态环境建设中的地位和作用. 西北农业大学学报, 2000, 28 (6): 130~134.
- [8] 陈云明, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵半干旱区人工沙棘林水土保持和土壤水分生态效益分析. 应用生态学报, 2002, 13 (11): 1389~1393.
- [9] 王克勤, 王斌瑞. 黄土高原刺槐林间伐改造研究. 应用生态学报, 2002, 13 (1): 11~15.
- [10] 王占礼, 王亚云, 黄新会, 等. 黄土裸坡土壤侵蚀过程研究. 水土保持研究, 2004, 11 (4): 84~87.
- [11] 张雪松, 郝芳华, 张建永. 降雨空间分布不均匀性对流域径流和泥沙模拟影响研究. 水土保持研究, 2004, 11 (1): 9~12.
- [12] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 黄土区深层土壤干燥化与土壤水分循环特征. 生态学报, 2005, 25 (10): 2491~2498.
- [13] 杨维西. 试论中国北方地区人工植被的土壤干化问题. 林业科学, 1996, 32 (1): 78~85.
- [14] 侯庆春. 小老树的分布及其生长特点. 水土保持学报, 1991, 1 (1): 64~72.
- [15] 赵景波, 周旗, 侯甬坚. 黄土高原土壤干层对生态环境建设的影响. 陕西师范大学学报:自然科学版, 2003, 31 (4): 93~97.
- [16] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. 自然资源学报, 2001, 16 (5): 427~432.
- [17] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水循环的影响. 生态学报, 1983, 3 (2): 91~101.
- [18] 侯喜禄, 白岗栓, 曹清玉. 黄土丘陵区森林水土保持效益及其机理的研究. 水土保持研究, 1996, 3 (2): 98~103.
- [19] 吴钦孝, 赵鸿雁, 刘向东. 黄河中游防护林体系建设与水土保持. 西安:西北大学出版社, 2000.
- [20] 李怀恩, 赵静, 王清华, 等. 黄土区坡面与小流域植被变化的水文效应分析. 水力发电学报, 2004, 23 (6): 98~102.
- [21] 张晓明, 余新晓, 武思宏, 等. 黄土区森林植被对坡面径流和侵蚀产沙的影响. 应用生态学报, 2005, 16 (9): 1613~1617.
- [22] 侯喜禄, 曹清玉, 白岗栓. 陕北黄土区不同森林类型水土保持效益的研究. 西北林学院学报, 1994, 9 (2): 20~24.
- [23] 李凯荣, 王佑民. 黄土高原沟壑区综合治理及其效益研究. 北京:中国林业出版社, 1990.