

黄土高原沟壑区不同树种的水土保持效益及其适应性评价

陈杰¹, 刘文兆^{1,2}, 张勋昌³, 张北赢², 王兵², 杨玉玲¹

(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 美国农业部 农业研究局 牧草地实验室, 俄克拉荷马州 埃尔里诺城 73036)

【摘要】 【目的】研究黄土高原沟壑区不同树种幼林的水土保持效益及其适应性。【方法】以草地为对照, 对黄土高原沟壑区刺槐、油松、沙棘、侧柏纯林及其混交林径流小区的产流产沙情况、土壤水分状况及各树种的生理特性进行了分析。【结果】造林初期, 各树种及其不同造林方式的水土保持效益均比较差, 处于水土保持功能低下阶段, 土壤侵蚀的差异主要是由植被的不同覆盖度引起的, 二者呈二次多项式关系; 回归分析表明, 当覆盖度达 53% 时土壤侵蚀较为轻微。草地和各树种林下 0~250 cm 土层土壤水分变化较大, 其中以刺槐消耗土壤水分最多, 其次是侧柏, 油松、沙棘和草地之间差异不明显; 刺槐纯林与其混交林下土壤水分的差异比较明显, 而其他树种不同造林方式下的土壤水分无明显差异。各树种叶片的水分利用效率表现为侧柏>油松≈沙棘>刺槐, 油松与沙棘混交造林后两者的水分利用效率都有显著提高; 各树种叶片的蒸腾速率表现为刺槐≈沙棘>油松>侧柏, 沙棘与油松或刺槐混交后, 油松与刺槐的蒸腾速率均有所降低, 而沙棘变化不显著。【结论】综合考虑树种的水保效益及其适应性可以发现, 沙棘与油松混交可能是黄土高原沟壑区较为适宜的一种造林方式。

【关键词】 黄土高原沟壑区; 造林树种; 造林方式; 水保效益; 土壤水分

【中图分类号】 S727.220.5; S725.3 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-9387(2008)06-0097-08

Soil and water conservation benefits and suitability of different forestation trees in tableland-gully area of the Loess Plateau

CHEN Jie¹, LIU Wen-zhao^{1,2}, ZHANG Xun-chang³, ZHANG Bei-ying²,
WANG Bing², YANG Yu-ling¹

(1 College of Resource 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 73036, El Reno, Oklahoma, USA)

Abstract: 【Objective】 Soil and water conservation benefits and suitability of different young afforested trees were evaluated in tableland-gully area of the Loess Plateau. 【Method】 The runoff, soil erosion, soil water content and physiological characteristics of, mono-species of *R. pseudoacacia*, *P. tabulaeformis*, *P. orientalis*, *H. rhamnoides* and their mixtures in vegetated runoff plots were analyzed taking grassland as a control. 【Result】 The results demonstrated that in the early stage of afforestation, the benefits of water and soil conservation were relatively poor for all afforested tree species and afforestation methods. The

* [收稿日期] 2007-07-10

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

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

[通讯作者] 刘文兆(1960—), 男, 陕西乾县人, 博士, 研究员, 博士生导师。主要从事流域水文生态与节水农业研究。

E-mail: wzliu@ms.iswc.ac.cn

differences of soil erosion amounts between each tree species under monoculture or biculture resulted from differences in vegetation cover. The relationship between soil erosion and vegetation cover could be expressed by a quadratic function. Regression analysis showed that soil erosion was not severe when vegetation cover was more than fifty percent. Soil water content varied with the soil depth within the top 250 cm in grassland and each woodlot, but it became more or less constant below the 250 cm depth. *R. pseudoacacia* consumed most soil water, followed by *P. orientalis*, *P. tabulaeformis*, and *H. rhamnoides* with the last two being similar to the grassland. There were no significant differences in soil water contents between monospecies and its binary mixtures, except for *R. pseudoacacia* and its mixtures. Water use efficiency followed the order of: $P. orientalis > P. tabulaeformis \approx H. rhamnoides > R. pseudoacacia$. The leaf water use efficiencies of both *P. tabulaeformis* and *H. rhamnoides* in the mixture were significantly increased compared to the monocultures. The leaf transpiration rates followed the order of: $R. pseudoacacia \approx H. rhamnoides > P. tabulaeformis > P. orientalis$. Compared to their monocultures, the leaf transpiration rates of *P. tabulaeformis* and *R. pseudoacacia* decreased in their biculture mixed with *H. rhamnoides*, while the transpiration rates of *H. rhamnoides* remained relatively constant. 【Conclusion】 Considering soil and water conservation benefits and adaptability of each tree species, we could conclude that the biculture of *H. rhamnoides* and *P. tabulaeformis* is very likely suitable for afforestation in tableland-gully areas of the Loess Plateau.

Key words: tableland-gully area of the Loess Plateau; afforested tree species; afforestation method; soil and water conservation benefit; soil water content

黄土高原因严重的水土流失而闻名于世,造成水土流失的原因除地形、土壤、降雨外,植被的破坏也是重要原因之一。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,引起了严重的水土流失^[1-2]。因此植被建设是防治水土流失的根本措施,也是黄土高原沟壑区固沟保塬的重要举措。研究不同林分水土保持效益在量上的差异和机理,对防治水土流失和黄土高原植被建设具有重要意义和参考价值。

通过植被建设治理水土流失的关键是造林种草,增加植被覆盖度^[3]。但是由于黄土高原特殊的自然条件,造林成活率很低,保存率更低。已有研究表明,黄土高原人工林在幼龄期生长基本正常,但8~10年后就会陆续出现干梢、矮小、枯死等生长不良状况^[4-5]。土壤水分不足特别是在2~4 m深处出现土壤干层,是导致这种状况的主要原因^[6]。而土壤干层的干燥强度因植物种类及其生长年限不同而又有差异^[7]。同时,树木在遭受长期水分不足的胁迫时,也会对环境产生适应性。不同树种的适应方式和适应能力有较大差异,不同树种的耗水量和水分利用效率(WUE)也就各不相同^[8]。光合作用特征是树木生理活性研究及其生产力预测与评估的重要手段,蒸腾速率是评价树木水分状况的最重要的生理指标,不同树种种类对水分的需求并不完全相同^[9],它们之间的比值能准确反映树木叶片的瞬间

或短期反应行为。在黄土高原地区造林时,首先必需对所选择的树种进行深入研究,了解该树种对土壤水分的消耗状况,探讨树种的蒸腾和光合特性及水分利用效率,才能切实提高造林质量,从根本上解决造林能否成功的问题。但目前有关通过不同树种及造林方式的水土保持效益、土壤水分状况、蒸腾和光合特性等,综合评价黄土高原沟壑区幼林适应性的研究还存在明显的不足,仍需进行深入研究。

为此,本试验研究了黄土高原沟壑区水土保持幼林、草地的水保效益、土壤水分状况以及水分利用效率,寻求水土保持效益好、土壤水分消耗少、水分利用效率高的森林类型,旨在为该区植被的恢复和建造及水土流失的防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验研究区——长武农业生态试验站,位于黄土高原中南部的陕西省长武县,始建于1984年,系中国科学院水利部水土保持研究所设在黄土高原沟壑区的野外试验站;该站位于北纬35°14′,东经107°41′,海拔940~1 220 m;属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水量582.3 mm,年均气温9.1℃,无霜期171 d,地下水埋深50~80 m;地貌类型属高塬沟壑区,塬面和沟壑两大地貌单元分别占35%和65%,地带性土壤为黑垆土,质地均匀疏松;该区植

被属暖温带落叶阔叶林带,塬面以种植业为主,已建成林网方田,梁峁坡地均实现了梯田化,既适宜农作物种植也适合果树栽培,沟谷地特指现代沟谷部分,因坡陡、水土流失严重、生态条件恶劣,而以造林种草等保护性措施为主。

1.2 研究方法

1.2.1 径流小区的布设 试验共设林草植被径流小区 9 个,于 2003 年建成,小区坡度均为 35°,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。植被于同年栽植,树苗平均株高约 60 cm。植被类型共设计 9

表 1 黄土高原沟壑区林草植被径流小区的基本情况

Table 1 General conditions of vegetated runoff plots in tableland-gully area of the Loess Plateau

植被类型 Vegetation type	混交比例 Mixed proportion	株行距/m Spacing	混交林树种 Species of mixture	平均株高/cm Average height	平均地径/cm Average ground diameter	郁闭度 Canopy density	覆盖度/% Coverage
草地(对照) Grassland (Control)	—	—	—	—	—	—	60~70
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	—	1×2	—	94.3	1.8	0.05	15~20
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	—	1×2	—	70.5	1.5	<0.05	10~15
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	—	1×2	—	163.4	1.9	0.05~0.15	60~65
侧柏 <i>P. orientalis</i>	—	1×2	—	87.8	1.5	0.05	5~10
油松×刺槐 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>R. pseudoacacia</i>	1:1	1×1	油松 <i>P. tabulaeformis</i> 刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	51.3 174.0	1.1 1.9	0.20~0.25	30~35
油松×沙棘 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>H. rhamnoides</i>	1:1	1×1	油松 <i>P. tabulaeformis</i> 沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	62.3 104.3	1.4 1.5	0.25~0.30	25~30
刺槐×沙棘 <i>R. pseudoacacia</i> × <i>H. rhamnoides</i>	1:1	1×1	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i> 沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	160.0 115.0	1.7 1.7	0.15~0.20	25~30
刺槐×侧柏 <i>R. pseudoacacia</i> × <i>P. orientalis</i>	1:1	1×1	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i> 侧柏 <i>P. orientalis</i>	157.4 106.8	1.6 2.2	0.15~0.20	50~60

1.2.2 观测项目与方法 用环刀法^[10]测定各小区表土(0~20 cm)容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度,计算总毛管孔隙度;雨后测量径流桶内的水深,乘以径流桶底面积计算径流量;将径流桶内的泥水搅拌均匀后取泥水样,过滤、烘干后测定水样泥沙重,然后折算成侵蚀模数。

2006-08-10 采用打钻取土烘干法测定各小区土壤水分状况,测定位置为各小区中央树种之间的空地,测定深度为 0~600 cm(其中 0~100 cm 按 10 cm 分层,100~600 cm 按 20 cm 分层),同时分 3 层(0~200,200~400,400~600 cm)计算了各层的土壤储水量及 0~600 cm 土壤总储水量,计算公式为:

$$W = \sum(w_i r_i h_i) \quad (1)$$

式中:W 为土壤储水量(mm);w_i 为各层的土壤质量含水量(%);r_i 为每层土壤的干容重(g/cm³),本研究中含重均取 1.3 g/cm³;h_i 为分层厚度(cm),取值为 10 或 20 cm。

种,包括刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)4 种纯林,刺槐和沙棘(*Robinia pseudoacacia* × *Hippophae rhamnoides*)、刺槐和侧柏(*Robinia pseudoacacia* × *Platycladus orientalis*)、油松和沙棘(*Pinus tabulaeformis* × *Hippophae rhamnoides*)、油松和刺槐(*Pinus tabulaeformis* × *Robinia pseudoacacia*)4 种混交林,以及作为对照的草地(通过移植天然草方块建成)。林草植被径流小区的基本情况见表 1,植被调查于 2006-08 进行。

应用 Li-6400 光合系统测定不同小区树种叶片的净光合速率(*P_n*)和蒸腾速率(*T_r*)等生理因子,测定时间为 2006-08-24 上午 10:00~11:30,每树种 5 个重复;叶片的水分利用效率(WUE)为净光合速率(*P_n*)与蒸腾速率(*T_r*)的比值。

1.2.3 数据统计分析 用 SAS 软件进行回归分析和单因素方差分析,用新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同树种及不同造林方式下的水土保持效益

2.1.1 不同树种及不同造林方式下的土壤物理性质 土壤容重及孔隙度是土壤的基本物理性质,对土壤的透气性、入渗性能、持水能力、溶质迁移特征以及土壤的抗侵蚀能力都有非常大的影响^[11]。林分枯落物的分解和植物根系的腐烂,可以增加土壤肥力,改善土壤结构和物理性质,从而影响降水的入渗和土壤的抗冲性^[12]。由表 2 可以看出,不同树种

及不同造林方式下,林(草)地的土壤容重为 1.16~1.21 g/cm³,相互之间无明显的差异。但总体来看,混交林的土壤容重均略小于纯林,这主要是由于混交林密度较大,活地被物及根系相对较多,对表层土壤起到一定的疏松作用,致使土壤的容重较低,总孔

隙度增大,但其改良作用仍十分有限。不同造林方式下,表层土壤毛管孔隙度的变化无明显规律,这主要是由于造林初期,林木植株较小,还未产生较多的枯枝落叶,也未形成腐殖质层,因此对土壤物理性质尚无明显的改善作用。

表 2 黄土高原沟壑区不同树种及不同造林方式下的土壤物理性质

Table 2 Soil physical properties under different forestation trees and afforestation methods in tableland-gully area of the Loess Plateau

植被类型 Vegetation type	容重/(g·cm ⁻³) Bulk density	总孔隙度/% Total porosity	毛管孔隙度/% Capillary porosity	非毛管孔隙度/% Non-capillary porosity
草地 Grassland	1.19	54.98	44.99	9.99
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	1.19	54.92	45.43	9.49
油松 <i>P. tabulae formis</i>	1.20	54.78	45.94	8.84
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	1.21	54.34	47.62	6.72
侧柏 <i>P. orientalis</i>	1.19	54.97	48.62	6.35
油松×刺槐 <i>P. tabulae formis</i> × <i>R. pseudoacacia</i>	1.16	56.30	46.09	10.21
油松×沙棘 <i>P. tabulae formis</i> × <i>H. rhamnoides</i>	1.16	56.36	47.31	9.05
刺槐×沙棘 <i>R. pseudoacacia</i> × <i>H. rhamnoides</i>	1.17	55.88	44.66	11.22
刺槐×侧柏 <i>R. pseudoacacia</i> × <i>P. orientalis</i>	1.18	55.40	47.90	7.50

2.1.2 不同树种及不同造林方式下的水土保持效益 造林后第 1 年即 2004 年,试验区的降雨量为 509.6 mm,汛期(7~9 月份)降雨量为 339.1 mm,

该年共产生了 9 次径流。对 2004 年的年径流量和侵蚀模数进行统计,其结果见表 3。

表 3 黄土高原沟壑区不同树种及造林方式下的年径流量和侵蚀模数

Table 3 Runoff amounts and soil erosion modulus under different forestation trees and afforestation methods in tableland-gully area of the Loess Plateau

植被类型 Vegetation type	径流量/ (m ³ ·hm ⁻²) Runoff amount	与草地径流量的比值 Ratio to grassland's runoff	侵蚀模数/(t·km ⁻²) Soil erosion modulus	与草地侵蚀模数的比值 Ratio to grassland's soil erosion modulus
草地 Grassland	16.29	1.00	3 136.4	1.00
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	16.23	1.00	1 718.4	0.55
油松 <i>P. tabulae formis</i>	19.96	1.23	5 492.7	1.75
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	18.92	1.16	2 229.0	0.71
侧柏 <i>P. orientalis</i>	24.59	1.51	2 328.2	0.74
油松×刺槐 <i>P. tabulae formis</i> × <i>R. pseudoacacia</i>	18.04	1.11	4 533.7	1.45
油松×沙棘 <i>P. tabulae formis</i> × <i>H. rhamnoides</i>	16.80	1.03	3 573.1	1.14
刺槐×沙棘 <i>R. pseudoacacia</i> × <i>H. rhamnoides</i>	17.30	1.09	4 396.6	1.40
刺槐×侧柏 <i>R. pseudoacacia</i> × <i>P. orientalis</i>	19.87	1.22	2 900.3	0.92

由表 3 可见,造林初期,各林分的蓄水保土效益均比较差。除沙棘纯林外,其他树种及不同造林方式下的径流量均大于草地,4 种纯林和 4 种混交林之间,分别以侧柏纯林和刺槐×侧柏混交林的径流量最大。纯林中以沙棘纯林的侵蚀模数最小,油松纯林最大;混交林中以油松×刺槐混交林的侵蚀模数最大,刺槐×侧柏混交林最小。其主要原因是因为造林初期乔木林的郁闭度很小,地被物层尚未形成,还达不到蓄水保土的功效,加之造林整地时对表层土壤的干扰很大,因此不论是纯林还是混交林,其径流量和侵蚀模数均较大;而草地由于具有较高的

地表覆盖度(60%~70%),有效减小了雨滴对地表的冲击,再加之植草时对地表的干扰较小,因此可以有效减少径流。在本研究中,沙棘纯林的侵蚀模数最小,这与侯喜禄等^[13]在安塞水土保持试验站研究得到的乔木林水土保持效益最好、灌木林次之、草地相对较差的结论不一致。究其原因,主要是由于本研究中乔木林还处在造林初期,林木长势较弱,对降雨的截流作用还不明显;而灌木沙棘的冠幅相对较大,能起到一定的截流作用。有研究表明,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^[14],而在造林初期,以

上这些条件尚不具备,因此本研究中9种植被方式的蓄水保土作用均比较差。按照吴钦孝^[15]对森林水土保持作用随年龄变化所划分的阶段可知,本研究的林分还处于水土保持功能的低下阶段。

表4 黄土高原沟壑区不同树种及造林方式下次降雨的径流量和侵蚀模数

Table 4 Amounts of event runoff and soil erosion modulus under different forestation trees and afforestation methods in tableland-gully area of the Loess Plateau

植被类型 Vegetation type	径流量/ ($m^3 \cdot hm^{-2}$) Runoff amount	与草地径流量的比值 Ratio to grassland's runoff	侵蚀模数/ ($t \cdot km^{-2}$) Soil erosion modulus	与草地侵蚀模数的比值 Ratio to grassland's soil erosion modulus
草地 Grassland	0.467	1.00	0.223	1.00
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	0.558	1.19	1.250	5.61
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	0.432	0.93	1.047	4.70
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i> .	0.610	1.31	0.613	2.75
侧柏 <i>P. orientalis</i>	0.940	2.01	3.979	17.84
油松×刺槐 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>R. pseudoacacia</i>	0.439	0.94	0.473	2.12
油松×沙棘 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>H. rhamnoides</i>	0.342	0.73	0.717	3.22
刺槐×沙棘 <i>R. pseudoacacia</i> × <i>H. rhamnoides</i>	0.609	1.30	0.839	3.76
刺槐×侧柏 <i>R. pseudoacacia</i> × <i>P. orientalis</i>	0.627	1.34	0.792	3.55

由表4可以看出,造林3年后,两次降雨中各林分总径流量的差异较大,其中大部分林分的径流量和所有林分的侵蚀模数都大于草地。侵蚀模数由小到大依次表现为:草地<油松×刺槐混交林<刺槐纯林<油松×沙棘混交林<刺槐×侧柏混交林<刺槐×沙棘混交林<油松纯林<沙棘纯林<侧柏纯林。其中由于刺槐纯林具有较高的覆盖度,故其侵蚀模数较低。除此之外,侵蚀模数总体上表现出草地<混交林<纯林的趋势,表明混交林的蓄水保土作用优于纯林,这主要是由于混交林具有较高的覆盖度所致。

2.1.3 土壤侵蚀量与林地(草)覆盖度的关系 由表1可知,各小区植被覆盖度具有明显的差异,其中以草地的覆盖度最大,其次为混交林,纯林的覆盖度普遍较低。对照土壤侵蚀模数(表4)与植被覆盖度(表1)可以发现,两者之间具有一定的相关性,即覆盖度大则侵蚀模数较小,侧柏、沙棘(成活率较低,仅为25%左右)、油松纯林由于覆盖度较低,因此侵蚀模数较大。另外,各小区均未形成较厚的枯枝落叶层,地面只有零星叶片,还达不到保持水土的作用。由此可知,不同树种及造林方式之间土壤侵蚀的差异,主要是因覆盖度的不同造成的。

上述分析表明,土壤侵蚀量与林地覆盖度之间存在十分密切的关系。据此对2006-09-04和09-26 2次降雨的侵蚀模数与林地的覆盖度进行了回归分析,发现两者具有极显著的相关性($P=0.002 <$

为了进一步探讨次降雨下不同树种及造林方式的水土保持效益,对2006-09-04和09-26 2次降雨(这两次降雨的降雨量分别为19.4和21.0 mm)引起的径流量和侵蚀模数进行了统计,其结果见表4。

0.01),侵蚀模数(y)与林地覆盖度(x)呈二次多项式关系,回归方程为:

$$y=4.9921-0.1795x+0.0017x^2, \\ r^2=0.910. \quad (2)$$

由式(2)可知,侵蚀模数与林地覆盖度呈负相关,即侵蚀模数随林地覆盖度的增加而减少。同时,由式(2)可知,当覆盖度达53%以上时土壤侵蚀才比较轻微,但该覆盖度大于吴钦孝^[15]黄土高原水土保持林有效覆盖度为44%的研究结论。可能由于本研究的结论是由幼林计算得出的,而幼林下缺乏枯枝落叶层和腐殖质层,根系密度也相对较小,因此需要较大的覆盖度才能达到较好的减沙效益。

2.2 不同树种的适应性评价

2.2.1 不同树种及不同造林方式下的土壤水分状况 土壤水分是植物生长需水的主要来源。一般来说,剖面土壤水分低湿层与植物根系活跃层是一致的。由图1可以看出,在草地及不同树种纯林下的0~250 cm土层,土壤含水量较低,说明这一土层植物根系较为密集。同时随着土层深度的增加,土壤含水量增大,按照吴钦孝^[15]对林地土壤水分层次的划分标准可知,该土层集中了速变层、活跃层和次活跃层3个层次。草地及不同树种林下土壤含水量最小的为刺槐纯林,其次为侧柏纯林,以草地最大,表明阔叶树种刺槐对土壤水分的消耗较多。250~600 cm土层土壤含水量相对较为稳定,属于土壤水分相对稳定层。但刺槐由于长势较好,郁闭度较高,消耗

了深层的土壤水分,因此其林下 0~600 cm 土层的土壤质量含水量低于其他树种。刺槐幼苗对土壤深层水分的消耗,容易引起其生长后期土壤出现干层,从而影响其后期生长。

土壤储水量和能量状况极大地影响着土壤的物理性质,并对整个生态系统的水热变化起决定作用^[15]。本研究将 0~600 cm 土层分为 0~200,200~400,400~600 cm 3 个层次,计算了不同树种及不同造林方式下的土壤储水量,其结果如表 5 所示。由表 5 可知,草地各层土壤的储水量均高于林地;而林地之中,以油松纯林的土壤总储水量最高,刺槐纯林土壤的总储水量及各层土壤的储水量均为最低。纯林土壤总储水量由高到低依次为油松纯林>沙棘纯林>侧柏纯林>刺槐纯林。混交林各层土壤总储水量由高到依次为刺槐×沙棘混交林>油松×沙棘混交林>油松×刺槐混交林>刺槐×侧柏混交林。另外,从表 5 土壤储水量的测定结果可以看出,对油松而言,无论是油松纯林还是混交林,其消耗的土壤水分均较其他树种和造林方式少。对于刺槐而言,纯林的土壤储水量明显低于混交林,主要是由于刺槐纯林中刺槐绝对株数较混交林多,长势较好,因此消耗的土壤水分更多所致。总体而言,无论是刺槐纯林还是其混交林,对土壤水分的消耗均较多。

表 5 黄土高原沟壑区不同树种及造林方式下 0~600 cm 土层的土壤储水量

Table 5 Soil water storage among 0~600 cm soil layer under different forestation trees and afforestation methods in tableland-gully area of the Loess Plateau

植被类型 Vegetation type	0~200 cm	200~400 cm	400~600 cm	合计 Total
草地 Grassland	346.6	491.5	517.3	1 355.4
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	327.9	405.2	445.6	1 178.7
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	343.3	465.6	458.1	1 266.9
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	236.0	334.1	393.5	963.6
侧柏 <i>P. orientalis</i>	289.7	402.6	432.0	1 124.3
油松×刺槐 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>R. pseudoacacia</i>	297.2	418.6	436.3	1 152.2
油松×沙棘 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>H. rhamnoides</i>	309.7	429.4	419.6	1 158.6
刺槐×沙棘 <i>R. pseudoacacia</i> × <i>H. rhamnoides</i>	301.7	472.2	485.7	1 259.6
刺槐×侧柏 <i>R. pseudoacacia</i> × <i>P. orientalis</i>	275.5	395.8	405.8	1 077.1

2.2.2 不同树种及造林方式下的叶片水分利用效率的差异 水分利用效率(WUE)反映了树木生产过程中能量的转化效率,是评价水分亏缺条件下树木生长适宜程度的一个综合生理生态指标,其在一定程度上反映了树木的耗水性和抗旱性。对不同树种及造林方式下叶片水分利用效率的方差分析结果(表 6)显示,各树种及不同造林方式下叶片水分利用效率的差异达极显著水平($P < 0.01$)。在纯林中,侧柏林的水分利用效率最高,其次为沙棘和油松林(两者差异不显著),刺槐林的水分利用效率最低。

以上结论进一步表明,刺槐对土壤水分消耗较大,可能会导致其生长后期土壤供水不足,从而影响其后期生长。

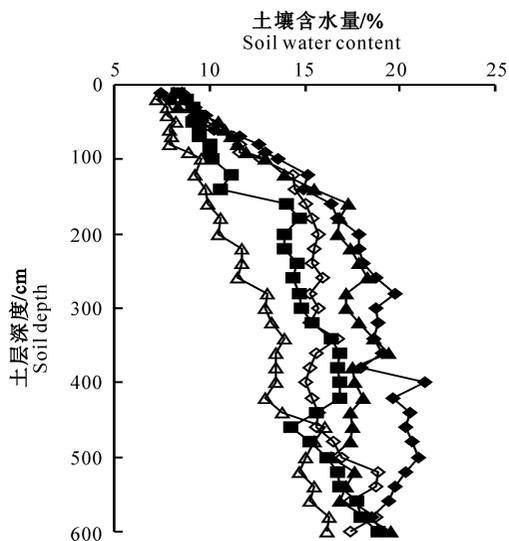


图 1 黄土高原沟壑区草地和不同纯林下 0~600 cm 土层土壤水分的变化

—◆— 草地;—◇— 沙棘;—▲— 油松;—△— 刺槐;—■— 侧柏
Fig. 1 Soil water content under grassland and different mono-species in tableland-gully area of the Loess Plateau
—◆— Grassland; ◇. *H. rhamnoides*; —▲— *P. tabulaeformis*; —△— *R. pseudoacacia*; —■— *P. orientalis*

对于同一树种的不同造林方式,在刺槐纯林与其不同混交林中,刺槐与沙棘混交时刺槐的水分利用效率显著提高,但刺槐的其他混交林间差异不显著;在沙棘与其不同混交林中,沙棘与刺槐混交时沙棘的水分利用效率显著降低。由此可见,刺槐水分利用效率的提高可能是以沙棘水分利用效率的降低为代价的。而对油松纯林与其不同混交林中,油松与沙棘混交时二者的水分利用效率均得到了显著提高。因此可以认为,油松与沙棘混交可能一种较好的造林方式。

表 6 黄土高原沟壑区不同树种及造林方式下叶片的水分利用效率(WUE)

Table 6 Multiple comparisons of water use efficiency (WUE) of leaves among different forestation trees and afforestation methods in tableland-gully area of the Loess Plateau

植被类型 Vegetation type	纯林的水分 利用效率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$) WUE of different forestation trees	植被类型 Vegetation type	刺槐的水分利用效率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$) WUE of <i>R. pseudoacacia</i>
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	5.75 a	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	4.75 a
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	5.77 a	刺槐 × 沙棘 <i>R. pseudoacacia</i> × <i>H. rhamnoides</i>	6.31 b
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	4.75 b	刺槐 × 油松 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>R. pseudoacacia</i>	4.50 a
侧柏 <i>P. orientalis</i>	6.77 c	刺槐 × 侧柏 <i>R. pseudoacacia</i> × <i>P. orientalis</i>	5.19 a

植被类型 Vegetation type	油松的水分利用效率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$) WUE of <i>P. tabulaeformis</i>	植被类型 Vegetation type	沙棘的水分利用效率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$) WUE of <i>H. rhamnoides</i>
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	5.77 a	沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	5.57 a
油松 × 刺槐 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>R. pseudoacacia</i>	5.26 a	沙棘 × 油松 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>H. rhamnoides</i>	6.02 b
油松 × 沙棘 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>H. rhamnoides</i>	8.25 b	沙棘 × 刺槐 <i>R. pseudoacacia</i> × <i>H. rhamnoides</i>	4.19 c

注:数据后标不同字母者表示差异显著($P < 0.05$),标相同字母者表示差异不显著($P > 0.05$)。

Note: There is significant difference by the different letter in each column at the significant level of 0.05%, vice versa.

2.2.3 不同树种及造林方式下叶片蒸腾速率的差异 水分利用效率是净光合速率与蒸腾速率协同反映的结果,为了进一步研究不同树种及造林方式下植物的耗水特征,对其叶片蒸腾速率(T_r)进行了统计分析。方差分析结果表明,各树种及不同造林方式之间(沙棘与其不同混交林除外)差异极显著($P < 0.01$)。进一步对其进行多重比较(表 7)可以发现,对于不同树种而言,侧柏纯林的蒸腾速率最低,其次为油松纯林,沙棘纯林和刺槐纯林的蒸腾速

率较高,但两者差异不显著,明显表现出鳞叶树种 < 针叶树种 < 阔叶树种的规律。对于同一树种的不同造林方式,刺槐纯林与其不同混交林中,刺槐与沙棘混交时刺槐的蒸腾速率显著降低,其他造林方式间差异不显著;油松纯林与其不同混交林中,油松与沙棘混交显著降低了油松的蒸腾速率;而沙棘纯林与其不同混交林之间的蒸腾速率差异不显著。因此,仅考虑蒸腾速率,油松与沙棘、刺槐与沙棘混交是较好的混交造林方式。

表 7 黄土高原沟壑区不同树种及造林方式下叶片的蒸腾速率(T_r)

Table 7 Multiple comparisons of transpiration (T_r) of leaves among different forestation trees and afforestation methods in tableland-gully area of the Loess Plateau

植被类型 Vegetation type	纯林的蒸腾速率/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) T_r of different forestation trees	植被类型 Vegetation type	刺槐的蒸腾速率/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) T_r of <i>R. pseudoacacia</i>
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	2.81 a	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	2.74 a
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	1.59 b	刺槐 × 沙棘 <i>R. pseudoacacia</i> × <i>H. rhamnoides</i>	1.42 b
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	2.74 a	刺槐 × 油松 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>R. pseudoacacia</i>	2.63 a
侧柏 <i>P. orientalis</i>	0.74 c	刺槐 × 侧柏 <i>R. pseudoacacia</i> × <i>P. orientalis</i>	2.74 a

植被类型 V egetation type	油松的蒸腾速率/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) T_r of <i>P. tabulaeformis</i>	植被类型 Vegetation type	沙棘的蒸腾速率/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) T_r of <i>H. rhamnoides</i>
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	1.59 a	沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	2.81 a
油松 × 刺槐 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>R. pseudoacacia</i>	1.38 a	沙棘 × 油松 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>H. rhamnoides</i>	4.06 a
油松 × 沙棘 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>H. rhamnoides</i>	0.58 b	沙棘 × 刺槐 <i>R. pseudoacacia</i> × <i>H. rhamnoides</i>	4.20 a

注:数据后标不同字母者表示差异显著($P < 0.05$),标相同字母者表示差异不显著($P > 0.05$)。

Note: there is significant difference by the different letter in each column at the significant level of 0.05%, vice versa.

3 结 论

(1)造林后第1年,各树种及不同造林方式的蓄水保土效益均比较差。除沙棘纯林外,其他树种及造林方式下的径流量均大于草地,侵蚀模数由小到大的顺序为,沙棘纯林<刺槐纯林<侧柏纯林<刺槐×侧柏混交林<草地<油松×沙棘混交林<刺槐纯林×沙棘纯林<油松×刺槐混交林<油松纯林;3年生树种的水土保持效益均低于草地,仍处于水土保持功能的低下阶段。在本研究条件下,不同覆盖度是引起林下土壤侵蚀差异的主要原因,植被覆盖度与土壤侵蚀模数呈二次多项式关系,回归分析表明,当幼林覆盖度达53%以上时,土壤侵蚀才会比较轻微。

(2)各植被类型下0~250 cm 土层土壤水分变化较大,说明这一土层植物根系较为密集。对不同树种而言,刺槐对土壤水分的消耗最大,其次为侧柏,油松、沙棘和草地之间差异不明显。刺槐纯林与其混交林下土壤水分的差异比较明显,而其他树种不同造林方式下的土壤水分差异不明显。

(3)各树种及不同造林方式下叶片水分利用效率的差异达极显著水平,各树种纯林之间水分利用效率的大小顺序为:侧柏纯林>油松纯林≈沙棘纯林>刺槐纯林;同时,油松与沙棘混交时两者的水分利用效率均有显著提高;各树种及不同造林方式之间叶片蒸腾速率的差异极显著(沙棘与其不同混交林除外),各树种之间蒸腾速率的大小顺序为:刺槐纯林≈沙棘纯林>油松纯林>侧柏纯林,同时,油松和刺槐与沙棘混交后二者的蒸腾速率均降低,而沙棘变化不显著。

(4)综合考虑不同树种及造林方式时的水土保持效益、土壤水分变化情况、水分利用效率和蒸腾速率可以发现,沙棘与油松混交可能是该区较为适宜的造林方式之一。

[参考文献]

[1] 于静洁,刘昌明. 森林水文研究综述 [J]. 地理研究,1989,8(1):88-98.
Yu J J, Liu C M. A Summary of research on forest hydrology [J]. Geographical Research, 1989, 8(1): 88-98. (in Chinese)

[2] 孟庆枚. 黄土高原水土保持 [M]. 郑州:黄河水利出版社,1996.
Meng Q M. Soil erosion on the Loess Plateau [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 1996. (in Chinese)

[3] 吴钦孝,杨文治. 黄土高原植被建设与可持续发展 [M]. 北京:科学出版社,1998.
Wu Q X, Yang W Z. Vegetation construction and sustainable development in the Loess Plateau [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

[4] 杨维西. 试论中国北方地区人工植被的土壤干化问题 [J]. 林业科学,1996,32(1):78-85.
Yang W X. The preliminary discussion on soil desiccation of artificial vegetation in the northern regions of China [J]. Scientia silvae sinicae, 1996, 32(1): 78-85. (in Chinese)

[5] 侯庆春. 小老树的分布及其生长特点 [J]. 水土保持学报,1991,1(1):64-72.
Hou Q C. The distribution and growth nature of the small older-tree [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 1(1): 64-72. (in Chinese)

[6] 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 [J]. 陕西师范大学学报:自然科学版,2003,31(4):93-97.
Zhao J B, Zhou Q, Hou Y J. Effect of dried layer of soil ecological environmental reconstruction [J]. Journal of Shaanxi Normal University: Natural science Edition, 2003, 31(4): 93-97. (in Chinese)

[7] 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. (in Chinese)

[8] 杨文文,张学培,王洪英. 晋西黄土区刺槐蒸腾、光合与水分利用的试验研究 [J]. 水土保持研究,2006,13(1):72-75.
Yang W W, Zhang X P, Wang H Y. Study on *Robinia pseudoscacia* L. transpiration, photosynthesis and water use efficiency [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(1): 72-75. (in Chinese)

[9] 周国逸. 生态系统水热原理及其应用 [M]. 北京:气象出版社,1997.
Zhou G Y. Principles and applications of water and heat in ecosystem [M]. Beijing: Meteorological Press, 1997. (in Chinese)

[10] 中国科学院南京土壤研究所物理研究室. 土壤物理性质测定法 [M]. 北京:科学出版社,1978.
Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science. Mensuration of soil physical property [M]. Beijing: Science Press, 1978. (in Chinese)

[11] 郑纪勇,邵明安,张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征 [J]. 水土保持学报,2004,18(3):53-56.
Zheng J Y, Shao M A, Zhang X C. Spatial variation of surface soil's bulk density and saturated hydraulic conductivity on slope in the Loess Region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(1): 53-56. (in Chinese)