

黄土丘陵区人工造林对不同土壤类型理化特性的影响

陈 军¹, 张红霞², 钟 文³, 李玉忠¹, 王春季¹

(1. 靖边县林业规划设计院, 陕西 靖边 718500; 2. 靖边县农业技术推广站, 陕西 靖边 718500; 3. 靖边县绿化中心, 陕西 靖边 718500)

摘 要:传统的观点认为黄土高原地区除了黄绵土以外,其他两种土壤(红黏土和风化岩沫土)由于营养贫瘠不能维持林木生长发育,不宜进行人工造林。为了拓展黄土丘陵区适宜人工造林的土壤范围,1996—2005 年,在陕西省延安市黄土丘陵区开展了土壤类型对人工造林影响的实验研究。结果表明,由于人工植被过度消耗土壤水分,黄绵土土壤地类大面积人工造林可能导致土壤水分短缺以及其它潜在的一系列风险。在红黏土和风化岩沫土土壤地类开展人工造林,单一树种的成活率与黄绵土接近、混交林成活率显著高于黄绵土,这两种土壤类型人工造林对土壤水分影响相对较小。因此,在水分条件适中的沟谷两岸,红黏土和风化岩沫土土壤地类具有开展人工造林的良好条件。

关键词:人工造林; 黄绵土; 红黏土; 风化岩沫土; 黄土高原

中图分类号:S714.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)01-0042-06

Impact of Afforestation on Physical and Chemical Properties of Different Soil Types in Loess Plateau of China

CHEN Jun¹, ZHANG Hong-xia², ZHONG Wen³, LI Yu-zhong¹, WANG Chun-ji¹

(1. Forestry Programming College of Jingbian County, Jingbian, Shaanxi

718500, China; 2. Agricultural Technology Popularizing Station of Jingbian County, Jingbian,

Shaanxi 718500, China; 3. Greening Centre of Jingbian County, Jingbian, Shaanxi 718500, China)

Abstract: Conventional afforestation in hilly area of Loess Plateau is only thought to be possible on loess soils because the local foresters consider the two other main soil types (red clay and bedrock-derived soils) too barren to support trees growth and development. In an attempt to determine whether these soils could also support afforestation, we planted trees on all three soil types in a hilly area of the Loess Plateau near Yan'an city from 1996 to 2005. Our results indicate that large-scale afforestation in loess soils could potentially increase the severity of soil water shortages, degrade the natural environment, and increase the risks of desertification and of serious economic losses because of over-consumption of soil moisture. However, survival rates on red clay and bedrock-derived soils were generally comparable to those on loess for individual species, and were superior to those on loess in mixed-species plantations, with less of an adverse impact on soil water. Hence, both red clay and bedrock-derived soils in low-lying areas with adequate soil moisture could potentially sustain afforestation in hilly area of Loess Plateau.

Key words: afforestation; loess soil; red clay; bedrock-derived soil; Loess Plateau

人工造林可有效地减少土壤侵蚀、保护退化生态环境^[1]、增加土壤有机质含量、改善土壤结构、增加区域碳储量^[2-3]、维持土壤养分良性循环^[4]、改善景观状态,为野生动物提供栖息场所^[5]。在未来几十年里,气候变化将对全球植被分布产生巨大影响^[6-7],这些影响在生态群落交错区的干旱半干旱生态脆弱区尤为显著^[8]。干旱是世界范围内植被分布的首要限制

因子之一^[9],对于水分利用率较低树种的影响尤为突出^[10-11]。由于缺乏成熟的有关干旱、沙漠化以及土壤类型与人工造林效果关系的研究结果作依据,这直接影响了黄土高原生态环境恢复的实践活动。因此,积极开展黄土丘陵区人工造林与不同土壤类型理化性状相互关系的研究,对我国大规模生态修复实践具有重要的指导意义。

黄土高原地质条件复杂,土壤理化性质差异显著,这些因素直接影响植被的生长发育和景观分布^[12],对丘陵沟壑区的影响尤为突出。陕北黄土丘陵区主要分布着三种土壤类型——黄绵土(占总面积的77.5%)、红黏土(占总面积的5.6%)以及位于岩床之上尚未成熟、砂岩含量较高的岩石土壤—风化岩沫土(占总面积的9.0%)^[13]。在数百万年前,黄土高原被大面积的黄绵土覆盖,由于土壤侵蚀,如今大部分表层土壤流失殆尽、黄土母质土裸露、土壤养分贫瘠。该区黄绵土土层厚度约50~200 m,位于0.5~5 m厚的红黏土土层之上,而红黏土土层下则是0.5~1 m厚的风化岩沫土土层。传统的观点认为,黄土丘陵区只有黄绵土土壤可以实施人工造林,其他两种土壤由于营养贫瘠不能维持林木生长发育。为了拓展黄土丘陵区人工造林的土壤类型范围,1996—2005年,选择陕西省延安市附近的黄土沟壑区,在上述三种土壤分布区开展人工造林与不同土壤类型理化性状相互关系的实验研究,研究黄土丘陵区红黏土和风化岩沫土土壤地类人工造林的可能性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市附近小砭沟小流域,北纬 $36^{\circ}32'$,东经 $109^{\circ}26'15''$,海拔993.7~1191.2 m,面积121 hm²。流域内水土流失严重,土壤侵蚀模数1.5万 t/(km²·a)^[14]。地形破碎、山坡陡峭、沟壑纵横,植被稀疏。研究区主要分布3种土壤类型:黄绵土占总面积77.5%,主要分布于山梁顶部和沟谷上坡面,平均厚度50~200 m,其中粒径1.00~0.05 mm的细沙粒含量大于20%,粒径0.010~0.001 mm的黏土含量小于30%,土壤有机质含量3.76 g/kg,平均孔隙度52.1%;风化岩沫土位于岩石顶部,占总面积9.0%,平均厚度0.5~1.0 m,主要分布于沟谷底部,其中粒径1.00~0.05 mm的细沙含量大于70%,粒径大于1.00 mm的粗沙含量大于10%,土壤有机质含量1.45 g/kg,土壤孔隙度41.9%;红黏土位于以上两种土壤之间,平均厚度0.5~5.0 m,占总面积5.6%,主要分布于黄绵土和风化岩沫土沉积物之间的坡面上,粒径0.010~0.001 mm的黏土含量大于40%,土壤有机质含量2.3 g/kg,土壤孔隙度44.9%^[15-16]。当地林业部门认为红黏土和风化岩沫土土壤侵蚀严重、营养贫瘠不能维持林木生长发育,因此不适合人工造林。但是,这些土壤类型主要分布于沟壑底部,土壤水分条件好于山梁顶部的黄绵土地类。研究区多年平均温度9.4℃,年均无霜期

147 d,年平均降雨量547.4 mm,其中413.6 mm集中于5—10月的雨季,1996—2005年实验期间平均每年422.2 mm的降雨分布于雨季,并且71.2%的降雨集中在6—9月,年均蒸发量为793.7 mm^[13]。

1.2 试验设计

试验区间隔10 m设置3个60 m×360 m的研究样区,每个研究样区按以上三种土壤类型分割成3块样地。1997年春分别于每个样地栽植6个树种、每个树种约400株的单一树种配置,以及按3种配置方式、每种配置约400株(两个树种各200株)的混交种植。由于地形地貌凹凸不平,小区在大小、形状及植株数量上略有不同。所选树种包括欧洲山杨(*Populus tremula* L)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L)、元宝枫(*Acer truncatum* Bge)6个单一树种配置,以及欧洲山杨与沙棘、沙棘与侧柏、刺槐与柠条3个混交配置。为了防止坡面土壤侵蚀,同时便于收集坡面径流促进树木生长发育,人工造林沿等高线按1.5 m反坡宽度反坡隔坡整地,并在反坡边缘修筑30 cm×30 cm×30 cm挡水边埂。人工林株行距为2 m×3 m。

1.3 数据监测

(1)生长发育。每年秋天10月,每行随机抽取10株树木测算树木保存率;并用钢卷尺测量当年新生枝条长度,计算每年生长量;同时,2005年7月,在每个样地随机抽取每种树木各20株进行树冠测量,包括最大及最小树冠半径计算冠幅面积;然后根据树种平均冠幅面积与存活株数得出树木郁闭度,树冠重叠及相互交叉时,应减去重叠部分,避免重复计算。

(2)土壤水分、孔隙度。每年雨季5—10月间的10日、20日、30日,在每个样地的每个树种配置小区随机选择三个取土点,每点分别取0—20,20—40,40—60,60—80 cm土样,于105℃烘干12 h测算土壤水分含量。同时,每年4月10日和10月10日,以同样的方式用环刀钻取30 cm深度土样测定土壤容重,计算土壤孔隙度。

(3)根量。2005年10月中旬,每个样地每个树种小区随机选择30株树木测定根量,每棵树距树干0.5 m处随机选三个样点,同时在距树干1.5 m处另选三个样点,使用6.8 cm土钻、以20 cm为一个分层单位,采集0~1 m土样,由于风化岩沫土土层较薄,其采样深度为0~0.8 cm。然后,分拣出每层根系,先于80℃烘箱烘干2 h,然后于120℃继续烘干24 h称重。

(4)土壤养分。1996年、2005年的10月,用土钻随机采集0—30 cm表层土样分析土壤营养成分含量,每个样地每个树种配置小区取土样1处。土壤有

机质通过重铬酸钾氧化法计算,全氮由碱性蒸馏法测定,全磷由原子吸收分光光度测定法计算,速效磷经碳酸氢钠萃取后用比色法测定,全钾经氢氟酸和高氯酸消化火焰光谱法测定,速效钾由醋酸铵萃取火焰光谱法测定。

1.4 统计分析

采用 Microsoft Excel 2003、*t* 检验、*p*<0.05 显著性水平进行数据统计分析。

2 结果分析

2.1 不同土壤类型林木存活与生长状况

研究结果表明,红黏土地类单一树种林地与混交林的树木保存率最高,分别为 74.2%和 77.6%,但树种间也存在明显差别(表 1)。欧洲山杨林在黄绵土地类表现最好,为 70%;沙棘在其它两种土壤表现较

好,分别为 83.5%和 74%。风化岩沫土人工林存活率变幅较大,单一树种林地 为 42.4%~80.0%,混交林 为 57.3%~77.0%,具有较强的树种选择性。

在红黏土地块,单一树种林地与混交林年平均枝条生长量分别为 0.50 m 和 0.52 m,其中,刺槐纯林年均生长量最高(1.07 m);混交林中刺槐—柠条表现最好,年均生长量达到 0.63 m。红黏土单一树种林地与混交林年平均生长量分别比黄绵土高 19%和 26.8%。在风化岩沫土地块的单一树种林地中,侧柏和刺槐长势较好,同时混交林总体上比黄绵土长势好。

红黏土中单一树种林平均树冠面积和郁闭度分别比黄绵土高 51.5%和 59.9%,混交林分别高 58.8%和 69.6%。风化岩沫土单一树种林地树冠面积与郁闭度分别比黄绵土地块高 17.0%和 13.9%,混交林则分别高 26.5%和 23.7%。

表 1 树木生长发育情况表

指标	土壤类型	单一树种林地							混交林			
		山杨	元宝枫	柠条	沙棘	刺槐	侧柏	平均	山杨+沙棘	侧柏+沙棘	刺槐+柠条	平均
保存率/%	黄绵土	70.0	65.3	80.0	55.7	81.8	79.2	72.0	65.5	67.4	83.5	72.1
	红黏土	55.3*	77.4	67.9	83.5*	82.7	78.3	74.2*	75.0*	77.0*	80.9	77.6*
	风化岩沫土	42.4*	68.7	59.2	74.0*	78.3	80.0	67.1*	57.3	77.0*	74.8	69.7
年生长量/ (m·a ⁻¹)	黄绵土	0.78	0.48	0.27	0.32	0.49	0.19	0.42	0.58	0.27	0.38	0.41
	红黏土	0.56*	0.45	0.20	0.51*	1.07*	0.22	0.50*	0.56	0.38*	0.63*	0.52*
	风化岩沫土	0.42*	0.29	0.19	0.35	0.88*	0.22*	0.39	0.42*	0.31	0.58*	0.44*
林冠 面积/m ²	黄绵土	2.28	2.93	0.83	2.11	3.56	0.26	2.00	2.93	1.39	2.47	2.26
	红黏土	1.24**	2.65*	0.50	4.84*	8.68*	0.29	3.03*	3.38	2.75*	4.64*	3.59*
	风化岩沫土	0.72*	0.97*	0.70	2.77*	8.57*	0.29	2.34*	2.00	1.75*	4.84*	2.86*
郁闭度/ %	黄绵土	26.60	31.91	11.05	19.54	48.58	3.80	23.58	34.46	15.58	34.33	28.12
	红黏土	11.43*	34.15*	5.70	67.40*	100*	3.76	37.07*	45.14	35.34*	62.62*	47.70*
	风化岩沫土	5.09*	11.13*	6.92	34.16*	100*	3.84	26.86*	21.58	22.41*	60.38*	34.79*

注:与黄绵土比较的差异显著性水平(*t*-检验)分别为: * 为 *p*<0.05; ** 为 *p*<0.01; *** 为 *p*<0.0001。下表同。

2.2 根系分布状况

2008 年监测结果表明,黄绵土树木根系分布相对较深(表 2),0—80 cm 树根总量与红黏土差异不显著,但风化岩沫土壤 0—80 cm 树根总量比黄绵土低 9.1%~16.3%。各类型土壤树木根系分布有所不同,红黏土中单一树种林地 0—20 cm 与 20—40 cm 表层土壤平均树根总量分别比黄绵土高 40.3%~18.4%,风化岩沫土单一林种这两层土壤树根总量分别比黄绵土高 32.2%~11.7%;60—100 cm 深层土壤单一树种人工林树根总量分布也大不相同,红黏土 60—80 cm、80—100 cm 土层树根总量分别比黄绵土低 37.3%和 50%,而风化岩沫土在 60—80 cm 土层内树根总量平均比黄绵土低 54.5%。

混交林根系分布差异显著(表 2),在 0—20 cm 和

20—40 cm 土壤表层,红黏土平均树根总量分别比黄绵土高 26.2%和 14.2%,风化岩沫土分别比黄绵土高 21.3%和 7.7%。但是在 60—80 cm 和 80—100 cm 深层土壤中,红黏土树根总量分别比黄绵土低 28.6%和 36.8%,风化岩沫土在 60—80 cm 土层的树根总量比黄绵土低 20.4%。

2.3 土壤养分

研究结果显示,1996 年试验初期,红黏土全 N、速效 N 及有机质含量分别比黄绵土 30 cm 表层土低 31.1%、45.8%、38.8%;风化岩沫土分别低 35.6%、54.2%、61.4%(表 3)。风化岩沫土中速效 P 含量比黄绵土低 33.3%。红黏土中全 K 和速效 K 分别比黄绵土中高 30.7%和 51.1%,风化岩沫土则分别高于黄绵土 47.1%、34%。

在 2005 年试验结束时,三种土壤类型样地表层 30 cm 土壤平均全 N、速效 N 及有机质含量分别比 1996 年试验开始时高 74.3%、97.9%、124.8%。相对每个土壤类型而言,风化岩沫土 2005 年平均全 N、速效 N 及有机质含量分别比 1996 年试验开始时高 96.6%、172.7%、278.6%;红黏土分别比 1996 年高 96.8%、142.3%、163.9%;而黄绵土则分别比 1996 年高 44.4%、39.6%、41.5%(表 3)。

表 2 2005 年不同类型土壤层根系密度分布 g/m³

土层深度/ cm	土壤类型	单一树种林地							混交林			
		山杨	元宝枫	柠条	沙棘	刺槐	侧柏	平均	山杨+ 沙棘	侧柏+ 沙棘	刺槐+ 柠条	平均
0—20	黄绵土	91	81	25	72	97	6	62	81	41	63	61
	红黏土	97	169*	38	98*	116	6	87*	103*	53*	75*	77*
	风化岩沫土	63	166*	34	106**	119	4	82*	88*	56*	78*	74*
20—40	黄绵土	207	169	113	210	228	56	163	207	131	169	169
	红黏土	260*	219*	103	241	257	77*	193*	241*	153*	185	193*
	风化岩沫土	210	225*	113	219	250	75*	182*	213	147*	185	182*
40—60	黄绵土	263	91	41	247	235	34	151	254	141	138	178
	红黏土	144*	75	53	194	188	31	114	178*	122	131	144
	风化岩沫土	116*	81	44	141	147	28	93	191*	85	103	126
60—80	黄绵土	188	169	38	104	138	25	110	144	63	88	98
	红黏土	81*	103*	19*	97	94*	22	69*	88*	59*	63*	70**
	风化岩沫土	53**	75**	22*	69*	63*	19*	50**	122**	53*	59*	78*
80—100	黄绵土	6	44	13	19	59	3	24	13	9	34	19
	红黏土	9	9*	3	9	38*	3	12*	9	6	19*	12*
	风化岩沫土	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0—80	黄绵土	749	510	217	633	698	121	486	686	376	458	506
	红黏土	582	566	213	630	655	136	463	610	387	454	484
	风化岩沫土	442*	547	213	535	579	126	407*	614	341	425	460*

注:由于风化岩沫土层浅薄且紧实,因此没有采集到 80—100 cm 土样。

表 3 不同类型土壤养分含量

年份	土壤类型	项目	全量/(g·kg ⁻¹)			速效成分/(mg·kg ⁻¹)			有机质/ (g·kg ⁻¹)
			N	P	K	N	P	K	
1996	黄绵土	含量	0.45	1.21	24.81	48	6	47	3.76
	红黏土	含量	0.31	1.08	32.43	26	5	71	2.3
		—黄绵土/%	—31.11**	—10.74	30.71*	—45.83*	—16.67	51.06*	—38.83*
	风化岩沫土	含量	0.29	1.02	36.5	22	4	63	1.45
		—黄绵土/%	—35.56**	—15.70	47.12**	—54.17*	—33.33*	34.04*	—61.44**
		—红黏土/%	—6.45	—5.56	12.55*	—15.38	—20.00	—11.27*	—36.96*
2005	黄绵土	含量	0.65	1.11	22.9	67	6	45	5.32
	红黏土	含量	0.61	1.01	32	63	4	64	6.07
		—黄绵土/%	—6.15*	—9.01	39.74*	—5.97	—33.33	42.22*	14.10*
	风化岩沫土	含量	0.57	0.95	30.45	60	4	60	5.49
		—黄绵土/%	—12.31*	—14.41	32.97*	—10.45*	—33.33*	33.33*	3.20
		—红黏土/%	—6.56	—5.94	—4.84	—4.76	0.00	—6.25	—9.56*

2.4 土壤水分和孔隙度

研究结果表明,1996 年风化岩沫土 0—80 cm 土壤水分含量最低,分别比红黏土和黄绵土低 36.9%和 33%;红黏土比黄绵土高 6.3%。但红黏土和风化岩沫土的孔隙度要分别比黄绵土低 13.8%和 19.6%。人工造林 9 a 后,红黏土和风化岩沫土的水

分含量分别比黄绵土高 50.8%和 59.2%,二者的孔隙度分别比黄绵土低 5.3%和 8.9%(表 4)。

3 讨论

人工造林可持续与否主要取决于树木对土壤理化性状的影响^[17]。有机质含量增加使得土壤容重下

降、孔隙度增加^[18],从而改善土壤水分和空气的渗透条件,提高土壤对水分和养分的存贮能力^[19]。干旱半干旱地区林地土壤条件恶化不仅影响植被生长发育,也不利于木材生产^[20]。一般认为,树种和植被的生长发育会对土壤理化性状和生物特性产生影响^[21]。该研究结果表明,土壤特性如水分、孔隙度及养分含量是制约林木生长发育最重要的影响因子,林木生长和根系发育同样受不同类型土壤理化特征的影响。陕北黄土高原丘陵区人工林在各类土壤中生长发育的表现顺序依次为:红黏土>风化岩沫土>黄绵土。

表 4 不同类型土壤水分、容重及孔隙度

年 份	土壤类型	项目	含水率/ %	容重/ (g · m ⁻³)	孔隙 度/%
1996	黄绵土	含量	16.2	1.27	52.08
	红黏土	含量	17.22	1.46	44.91
		—黄绵土/%	6.30**	14.96*	—13.77*
	风化岩沫土	含量	10.86	1.54	41.89
		—黄绵土/%	—32.96*	21.26***	—19.57**
		—红黏土/%	—36.93***	5.48	—6.72
2005	黄绵土	含量	7.21	1.12	57.69
	红黏土	含量	10.87	1.20	54.62
		—黄绵土/%	50.76***	7.14	—5.32
	风化岩沫土	含量	11.48	1.26	52.54
		—黄绵土/%	59.22***	12.50*	—8.93
		—红黏土/%	5.61	5.00	—3.81

注:表中数据为同一类型土壤中不同造林模式下土壤性状平均值。

退化草地的植被修复常常伴随着土壤养分和有机碳含量的增加、土壤结构的改善^[22]。这种由植被恢复带来的生态环境修复增加了土壤温度,在土壤水分含量适宜时可以增加微生物活动,从而加快有机质分解,提高土壤有机氮含量增加的速度^[23-24]。研究结果表明,人工造林后土壤水分、孔隙度、全 N、速效 N 及有机质含量发生了明显改变,研究期间林木生长良好,土壤养分条件保持相对稳定,甚至得到较大改善,尤其全 N、速效 N 以及有机质含量增加最为显著;但各类土壤水分含量均有所下降,这是潜在的不利结果;植被覆盖增加,土壤 C、N 库也相应增加,改善效果依次为:风化岩沫土>红黏土>黄绵土。

历史研究结果表明,土壤物理性状强烈影响植被生长状态^[25],对植物根系发育、植被生长、水分保持、水气渗透、孔隙度维持及土壤抗根系穿透能力等方面均起着重要作用^[26]。土壤理化条件的异质性为植物生长发育提供了可能,即使在粘实的土壤环境里也是如此。因为异质性使粘实的土壤环境存在裂缝、并具有通透性,这使得土壤水分和空气环境得以改善,为植物根系生长发育提供了空间条件^[25]。试验区红黏

土和风化岩沫土属于土石混合土壤,与黄绵土相比,养分含量低、孔隙度低。大范围的土壤板结往往伴随土壤结构退化,同时孔隙度下降会导致土壤通风、排水、植被可利用水分贮存能力下降以及根系发育受阻等一系列不利影响。该研究结果表明,黄土高原丘陵区三种土壤的孔隙度在造林期间均有所增加、土壤容重相应减小、土壤养分水平也迅速提高,这些变化表明人工造林对区域土壤环境产生了积极的影响。

一般来说,人工造林可以潜在地增加土壤养分输入,有助于提高土壤水分含量,促进植物生长发育^[26]。尽管土壤水分可以通过土壤养分变化而改变,但这些变化效应还取决于土壤的其它特性^[27]。在不同土壤中,相同土壤水分含量会产生不同的生理机能效应,因为土壤水分的可利用效率(即水势或水位)不仅取决于土壤孔隙度和土壤颗粒组成,还取决于土壤分布的地形差异。研究区红黏土和风化位于沟谷底部,具有丰富的地下水供给。同时,山坡径流在沟谷受到树木以及造林工程的阻隔,这有利于降雨入渗至深层土壤,起到了天然灌溉的作用,这些因素使得这两种土壤在干旱环境下更容易维持林木生长发育。

干旱缺水是制约全球植物生长发育和植被类型分布的首要限制因素^[28-29]。因此,由干旱造成的林木成活率下降是影响人工造林成败的关键因子之一^[27]。为了提高我国的森林覆盖率,林业部门常常在降雨仅仅能维持树木存活的干旱半干旱地区开展人工造林^[30]。因此,为了避免人工造林失败,必须谨慎选择适宜水资源条件的树种^[31]。长期经验表明,由于年降雨稀少、树种选择不合理以及密度过高造成林地土壤水分缺乏^[30-33],干旱年份位于我国干旱半干旱地区的河北、山西、陕西、甘肃、宁夏、新疆、内蒙古等地均出现大面积人工林死亡和林地物种多样性减少等现象^[30]。尽管该试验区林木生长良好,同时土壤理化性状有所改善,但这些改善却是以不断消耗土壤水为代价的。

研究结果表明,黄绵土林木消耗土壤水分的速度比土壤蓄积天然降水的速度快,因此,黄绵土植被覆盖度没有其他两种土壤增加的快。这表明当地林业部门可能被短期内林木成活现象所误导,从而优先选择在黄绵土开展人工造林。同我国其它地区造林失败一样^[30-32],从长远来看,陕北黄土丘陵区黄绵土地类人工造林也存在失败的风险。尽管研究区红黏土和风化岩沫土肥力较低,然而它们位于沟谷底部,具有较丰富的地下水供给。与黄绵土相比,这两类土壤物理性状改善了土壤的蓄水能力,土壤水分含量在造林后相对稳定。由此可见,在红黏土及风化岩沫土分

布的谷地开展人工造林将是更有价值的选择。由于这两种土壤土层较薄,因此,浅根性树种如沙棘和刺槐的生长发育,沙棘与刺槐或侧柏混交林以及刺槐与柠条混交林更适合在这类土壤混交种植。

参考文献:

- [1] Oscar C. An analysis of externalities in agroforestry systems in the presence of land degradation[J]. *Ecol. Econ.*, 2001,39:131-143.
- [2] Cornelis K G, Shaikh S L, Suchanek P. Mitigating climate change by planting trees: The transaction costs trap[J]. *Land Econ.*, 2002,78:559-559.
- [3] Jackson R B, Banner J L, Jobbagy E G, et al. Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands[J]. *Nature*, 2002,418:623-626.
- [4] Thomas G F. Afforestation in Uruguay: Study of a changed landscape[J]. *J. For.*, 2001,99:35-39.
- [5] Franco D, Mannino I, Zanetto G. The impact of agroforestry networks on scenic beauty estimation[J]. *Landsc. Urban Plan.*, 2003,62:119-138.
- [6] Allen C D, Breshears D D. Drought-induced shift of a forest-woodland ecotone: Rapid landscape response to climate variation[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1998,95:14839-14842.
- [7] Woodwell G M. The functional integrity of normally forested landscapes: A proposal for an index of environmental capital[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2002, 99:13600-13605.
- [8] Tilman D, Fargione J, Wolff B, et al. Forecasting Agriculturally Driven Global Environmental Change[J]. *Science*, 2001,292:281-284.
- [9] Schume H, Jost G, Hager H. Soil water depletion and recharge patterns in mixed and pure forest stands of European beech and Norway spruce[J]. *J. Hydrol.*, 2004, 289:258-274.
- [10] 王力,邵明安,张青峰. 陕北黄土高原土壤干层的分布和分异特征[J]. *应用生态学报*, 2004,15(3):436-442.
- [11] 赵景波,李瑜琴. 陕西黄土高原土壤干层对植树造林的影响[J]. *中国沙漠*, 2005,25(3):370-373.
- [12] Dai Y. The science of containing water and soil[M]. Xi'an: The Press of Xibei Agricultural University, 1993.
- [13] 延安市水土保持工作队. 延安市水土保持规划[M]. 西安:地图出版社, 1985.
- [14] 曹世雄,陈莉,高旺盛. 在黄土丘陵区土质路面种草[J]. *生态学报*, 2005,25(7):1754-1763.
- [15] 曹世雄,陈莉,高旺盛. 黄土丘陵区三种典型土地造林技术[J]. *生态学杂志*, 2005,24(12):1543-1548.
- [16] 曹世雄,陈莉,高旺盛. 黄土丘陵区软埂梯田复式配置技术[J]. *应用生态学报*, 2005,16(8):1443-1449.
- [17] Eetvelde V V, Antrop M. The significance of landscape relic zones in relation to soil conditions, settlement pattern and territories in Flanders[J]. *Landsc. Urban Plan*, 2005,70:127-141.
- [18] Baldock J A, Nelson P N. Soil organic matter[M]// Sumner M E. *Handbook of Soil Science*. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [19] Celik I. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey[J]. *Soil & Tillage Res.*, 2005,83:270-277.
- [20] Wang W Y, Wang Q J, Wang C Y, et al. The effect of land management on carbon and nitrogen status in plants and soils of alpine meadows on the Tibetan plateau[J]. *Land Degrad. Dev.*, 2005,16:405-415.
- [21] Priha O, Lehto T, Smolander A. Mycorrhizas and C and N transformations in the rhizospheres of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* seedlings[J]. *Plant Soil*, 1999,206:191-204.
- [22] Menyailo O V, Hungate B A, Zech W. The effect of single tree species on soil microbial activities related to C and N cycling in the Siberian artificial afforestation experiment: Tree species and soil microbial activities[J]. *Plant Soil*, 2002,242:183-196.
- [23] Ruth-Balaganskaya E, Myllynen-Malinen K. Soil nutrient status and revegetation practices of downhill skiing areas in Finnish Lapland: a case study of Ylläes[J]. *Landsc. Urban Plan*, 2000,50:259-268.
- [24] Hazlett P W, Gordon A M, Voroney R P, et al. Impact of harvesting and logging slash on nitrogen and carbon dynamics in soils from upland spruce forests in northeastern Ontario[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 2007, 39:43-57.
- [25] Letey J. Relationship between soil physical properties and crop production[J]. *Adv. Soil Sci.*, 1985, 1: 277-294.
- [26] Putz G, Burke J M, Smith D W, et al. Modelling the effects of boreal forest landscape management upon streamflow and water quality: Basic concepts and considerations[J]. *J. Environ. Eng. Sci.*, 2003,2:87-101.
- [27] Graciano C, Guimét J J, Goya J F. Impact of nitrogen and phosphorus fertilization on drought responses in *Eucalyptus grandis* seedlings[J]. *For. Ecol. Manage.*, 2005,212:40-49.
- [28] Ginsberg P. Afforestation in Israel[J]. *J. For.*, 2000, 98:32-36.
- [29] Raffaelli D. Ecology: How Extinction Patterns Affect Ecosystems[J]. *Science*, 2004,306:1141-1142.
- [30] 王国梁,刘国彬,周生路. 黄土高原土壤干层研究述评[J]. *水土保持学报*, 2003,17(6):156-169.
- [31] 曹世雄,陈军,陈莉,等. 退耕还林项目对陕北地区自然与社会的影响[J]. *中国农业科学*, 2007,40(5):972-979.
- [32] 刘刚,王志强,王晓岚. 吴旗县不同植被类型土壤干层特征分析[J]. *水土保持研究*, 2004,11(1):126-129.
- [33] 许翠,隋鹏,谢光辉,等. 杨农复合种植模式土壤水分效应及生产力分析[J]. *中国农业科学*, 2006,39(4):758-763.