

干热河谷不同岩土组成坡地的降水入渗 与林木生长*

杨 忠 熊东红 周红艺 张信宝

(中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要 坡地对降水的入渗能力是决定干热河谷坡地土壤水分条件和林木生长的重要因素, 坡地入渗能力低是造成干热河谷土壤干旱的主要原因之一. 由于岩土孔隙状况的差异, 不同岩土组成坡地的入渗能力差异较大. 片岩坡地入渗速率为 1.40~8.67 mm/min, 砂砾层坡地为 6.33 mm/min, 砾石层坡地为 0.69~2.20 mm/min, 轻度侵蚀泥岩坡地为 0.6~1.3 mm/min, 强度侵蚀泥岩坡地为 0.03~0.63 mm/min. 泥岩坡地土体黏重板结, 入渗能力弱, 天然降水入渗少, 对土壤水分的有效补充较少. 在干旱季节土体极其干旱, 林木生长停止, 甚至受到干旱的生理伤害枯死, 林分生产力低, 极难恢复森林植被. 片岩坡地、砾石层坡地、砂砾层坡地等石质山地土体裂隙发育, 入渗能力强, 天然降水入渗多, 对土体水分的有效补充较多, 在干旱季节岩土深层有少量有效储水供林木吸收利用, 维持其正常生理活动的水分需要, 林木生长较泥岩坡地上的林木生长快, 林分生产力高. 干热河谷的植被恢复应针对不同坡地类型生境的土壤水分条件, 主要依靠优势生活型植物种类, 进行乔-灌-草不同生活型植物类型的合理配置, 建立起植被与生境土壤水分条件的群落生态关系, 方能达到成功的目的. 另一方面, 增加降水入渗的造林整地措施和集流入渗的工程措施是干热河谷植被恢复的主要技术关键之一.

关键词 干热河谷 岩土性质 降水入渗 林木生长

金沙江干热河谷是我国典型生态脆弱区之一, 人类活动使干热河谷自然植被遭到极大破坏, 引起严重的水土流失和生态的强烈退化^[1,2]. 干热河谷气候炎热干旱, 特别是在春季和初夏的植物生长季节, 水热矛盾尤为突出. 由于干旱的

2003-08-11 收稿, 2003-12-31 收修改稿

* 国家自然科学基金项目(批准号: 49602041)和国家攻关课题项目(2001BA606A-07)资助

生境条件, 原生植被一旦遭到破坏便极难恢复, 干热河谷一直是我国长江中、上游地区植被恢复的重点和难点。

水分是植物生活环境的重要生态因子。降水入渗对干旱地区山地土壤水分条件起着重要的作用^[3,4]。初步研究表明, 坡地岩土组成是干热河谷土壤水分和植被恢复的关键性因子之一^[1]。查明干热河谷不同岩土组成坡地的降水入渗特征及其对林木生长的影响, 对干热河谷植被恢复具有重要的理论和现实意义。

1 试验区概况和研究方法

1.1 试验区概况

试验区位于云南省元谋干热河谷区, 年平均气温为 21.9℃, 年均降雨量为 613.8 mm, 全年干湿季分明。雨季(5~10 月)降雨量为 611.3 mm, 占年降雨量的 92%。年均蒸发量为 3911.2 mm, 是降雨量的 6.2 倍。年均相对湿度 53%, 年均干旱指数 2.8, 气候与稀树草原(Savanna)气候相似。元谋干热河谷基带土壤为燥红土, 其天然植被以车桑子(*Dononaea uiscosa* (L.) jacq) + 扭黄茅(*Heteropogon contortus*)灌草丛为主, 为次生稀树草原植被类型^[3,4], 天然植被覆盖率极低。1990 年全县森林覆盖率仅为 5.2%, 天然植被覆盖率低于 30%, 大部地区地表裸露, 水土流失十分严重, 许多地段土壤 A 层被冲蚀, 中度以上水土流失面积占全县国土面积的 50%^[2]。近年来, 当地政府依托“长治”、“长防”等国家工程项目开展了大规模的以赤桉(*Eucalyptus camaldulensis* Dehnl)为主的植被恢复工作, 取得了较大的成效, 但由于干热河谷植被恢复难度较大, 并缺乏科学理论的指导, 不同类型坡地造林成败差异较大。

元谋干热河谷地貌为侵蚀低山丘陵地貌, 冲沟极为发育。我们根据坡地岩土组成将元谋干热河谷坡地初步划分为 4 种坡地类型^[5~12]。(1) 早更新统元谋组泥岩坡地(泥岩坡地); (2) 元古界变质岩片岩坡地(片岩坡地); (3) 上新统砂沟组砂砾岩坡地(砂砾岩坡地); (4) 阶地砾石层坡地(砾石层坡地)。不同岩土组成坡地上的土壤水分和植物生长差异较大^[5~12]。

1.2 研究方法

对不同岩土组成坡地设置典型样地, 利用双环法测定不同岩土组成坡地的入渗速率^[13], 同时采集原状土样, 测定分析不同土壤层次的岩土物理性质和土壤水分特征值。土壤机械组成采用吸管法测定^[14], 土壤孔隙度和饱和渗透系数采用森林土壤圆筒试样测定法测定^[15]。

为了查明干热河谷不同岩土组成坡地桉树人工林的生物量及其与坡地岩土物理性质和土壤水分的关系, 对 4 种坡地类型上种植的桉树人工林共设置 14 个样方(样方面积为 20 m×20 m)进行了桉树人工林生长状况调查。调查树种为赤

校, 采用营养袋育苗移栽造林, 林龄为 6~8 年. 对样地内所有桉树用常规测树学方法进行每木检尺调查, 根据调查结果, 在样地内伐倒平均木一株, 用分层切割法测定平均木地上部分生物量. 根系生物量以主根为中心, 按定植株行距分层挖取测定, 挖深 1.2 m. 林分生物量用平均木生物量乘以种群密度计算. 灌木层、草本层和枯枝落叶层现存量测定采用直接收获法测定, 即全部伐下样方内所有植物进行实测称重, 样方面积分别为灌木 2 m×2 m 和草本 1 m×1 m.

2 结果与分析

2.1 不同岩土组成坡地土壤的主要物理性质

不同岩土组成坡地土壤的主要物理性质见表 1 和表 2, 由表中可见, 泥岩坡地黏粒含量高, 容重大, 表土层<0.002 mm 的黏粒含量>20%, <0.02 mm 的颗粒>40%, 底土层<0.002 mm 的黏粒含量>40%, <0.02mm 的颗粒含量>60%, 此类

表 1 元谋干热河谷不同岩土组成坡地土壤的机械组成

坡地类型	土层深度 /cm	比重 /g·cm ⁻³	容重 /g·cm ⁻³	机械组成/%					
				>30 mm	30~10 mm	10~2 mm	2~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm
强度侵蚀 泥岩坡地	0~10	2.55	1.42	0	0	0.05	72.17	9.75	18.03
	10~30	2.62	1.36	0	0	0.08	47.43	15.00	37.49
	>30	2.68	1.63	0	0	0	40.20	18.42	41.38
轻度侵蚀 泥岩坡地	0~30	2.65	1.35	0	0	0.68	55.09	23.15	21.08
	30~70	2.61	1.16	0	0	0.63	57.59	20.36	21.22
	70~110	2.62	1.38	0	0	0.48	49.67	21.30	28.55
	>110	2.62	1.55	0	0.29	3.51	37.08	15.96	43.17
砾石层坡地	0~20	2.66	1.79	8.54	37.00	12.56	22.93	9.14	4.63
	20~100	2.62	1.75	21.70	30.60	15.29	27.42	2.72	2.26
	>100	2.66	1.61	0	0	0.07	21.87	8.17	69.88
片岩坡地	0~25	2.70	1.68	9.98	37.32	8.87	23.11	13.52	7.22
	25~140	2.67	1.81	13.18	42.51	13.98	18.47	7.36	4.56
	140~360	2.67	□	□	□	□	□	□	□
砂砾层坡地	0~300	2.65	1.72	0	10.00	26.02	50.10	7.20	6.68

表 2 干热河谷不同岩土组成坡地的主要物理特征值

坡地类型	土层深度 /cm	总孔隙度 /%	毛管孔隙 /%	通气孔隙 /%	有效孔隙 /%	饱和渗透系数 /mm·min ⁻¹	稳定入渗速率 /mm·min ⁻¹
强度侵蚀 泥岩坡地	0~10	44.31	25.27	19.04	12.26	0.1472	0.03~0.63
	10~30	48.09	39.89	8.29	21.58	0.0080	
	>30	39.18	32.15	6.85	6.30	0.0014	
轻度侵蚀 泥岩坡地	0~30	49.06	32.54	22.46	20.66	0.1411	0.60~1.31
	30~70	55.56	36.17	19.50	27.69	0.2358	
	70~110	47.33	32.22	15.09	15.39	0.1014	
	>110	40.84	35.75	5.12	11.46	0.0006	
砾石层坡地	0~20	32.71	23.03	9.57	16.29	0.0401	0.62~2.20
	20~100	33.21	22.00	11.25	12.82	0.0601	
	>100	39.47	31.61	7.02	4.84	0.0042	
片岩坡地	0~25	37.78	27.39	10.56	13.37	0.1915	1.40~8.67
	25~140	32.21	23.29	9.01	19.51	0.2247	
	140~360	11.20	□	11.20	□	□	
砂砾层坡地	0~300	35.09	22.54	12.58	10.54	□	6.33

坡地土层越深, 土体黏粒含量越高. 侵蚀作用不仅剥削了活土层的厚度, 而且使表土层 $<0.02\text{ mm}$ 的土粒被冲蚀, $2\sim0.02\text{ mm}$ 的土粒为泥岩坡地表土层的优势组分. 从总体上看, 泥岩坡地黏粒含量高, 孔隙度较大, 表层土体孔隙度一般为 $45\%\sim55\%$, 但 $20\sim60\text{ cm}$ 以下的底土层土体中通气孔隙度较低, 土体黏重板结, 通透性极差, 饱和渗透系数为 $10^{-3}\sim10^{-4}$ 数量级, 为泥岩坡地降水入渗的限制层.

片岩坡地、砾石层坡地、砂砾层坡地等石质山地土体以 $>2\text{ mm}$ 的石砾、石块为主要组分, 石砾、石块的间隙部分填充以 $0.02\sim2\text{ mm}$ 粒径颗粒为主要组分的土壤. 石质山地孔隙度较泥岩坡地小, 总孔隙度一般为 $30\%\sim35\%$, 但通气孔隙度高, 在 $150\sim200\text{ cm}$ 的土体深度范围内裂隙发育, 通透性能较好, 渗水能力强, 饱和渗透系数为 $0.04\sim0.25\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

2.2 干热河谷不同岩土组成坡地的降水入渗

元谋干热河谷坡地的入渗速率特征曲线见图 1, 入渗速率特征曲线可用幂函

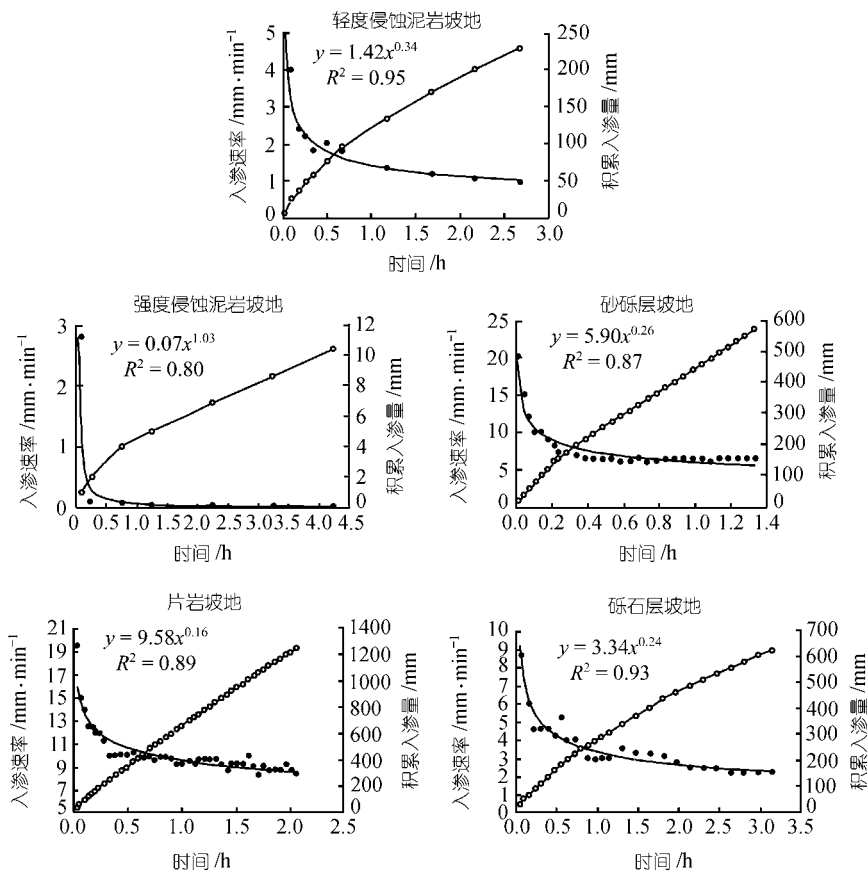


图 1 元谋干热河谷不同岩土组成坡地的入渗速率曲线

数 $y = ax^b$ 加以描述. 不同岩土组成坡地的稳定入渗速率分别为: 片岩坡地($1.40 \sim 8.67 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), 砂砾层坡地($6.33 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), 砾石层坡地($0.69 \sim 2.20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), 轻度侵蚀泥岩坡地($0.6 \sim 1.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), 强度侵蚀泥岩坡地($0.03 \sim 0.63 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$). 可见, 不同岩土组成坡地的入渗能力差异较大. 泥岩坡地入渗能力最低, 特别是强烈侵蚀的泥岩坡地入渗能力极低, 部分泥岩坡地的入渗速率低于 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 在降雨季节的中后期, 降水极难入渗, 降水对土壤的水分补充较少. 石质山地入渗能力远高于泥岩坡地, 部分坡地入渗能力极强, 稳定入渗速率达到 $8 \sim 10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 降水对土壤的水分补充较多.

坡地入渗能力与土壤孔隙状况具有密切的关系. 通过相关和回归分析表明, 饱和渗透速率与非毛管孔隙度呈显著的线性相关关系(见图 2). 由此可见, 泥岩坡地B层至C层土体的非毛管孔隙度低, 致使其饱和渗透系数低至 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 数量级, 水分很难通过重力水的形式渗入, 成为泥岩坡地水分入渗的限制因素. 而石质山地的非毛管孔隙度高, 通透性较好, 饱和渗透系数为 $0.04 \sim 0.25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

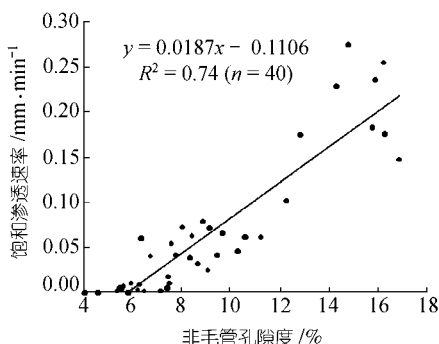


图2 渗透速率与非毛管孔隙度的关系

从整体看, 由于岩土性质的差异, 干热河谷坡地的入渗能力远低于我国黄土高原等其他干旱区^[12], 坡地入渗能力低是造成干热河谷土壤干旱的主要原因之一. 当然, 天然降水入渗对土壤水分含量的贡献除与土壤入渗能力有关外, 还与水分入渗的深浅、壤中流和入渗水分的保持状况等因素有关. 但无论如何, 非毛管孔隙度和稳定入渗速率可作为干热河谷衡量土壤侵蚀、坡地水分条件和植被恢复微地形规划的重要指标.

2.3 干热河谷林木生长与坡地入渗能力的关系

(i) 元谋干热河谷不同岩土组成坡地桉树的个体生长进程. 图 3 中的树高和基径的生长曲线清晰地显示了元谋干热河谷不同类型和侵蚀状况坡地上桉树的生长情况. 可见, 不同岩土类型和侵蚀状况坡地上的桉树树高和基径的生长进程差异较大. 从总体上看, 砾石层坡地、裂隙发育片岩坡地、砂砾层坡地等石质山地上的桉树生长较泥岩坡地快, 裂隙发育片岩坡地、砂砾层坡地等入渗能力较强坡地上的桉树前期生长较慢, 后期生长加快. 而轻度侵蚀泥岩坡地上的桉树前期生长较快, 后期生长减慢.

不同岩土组成坡地上桉树生长进程的差异说明了林木生长与不同岩土组成

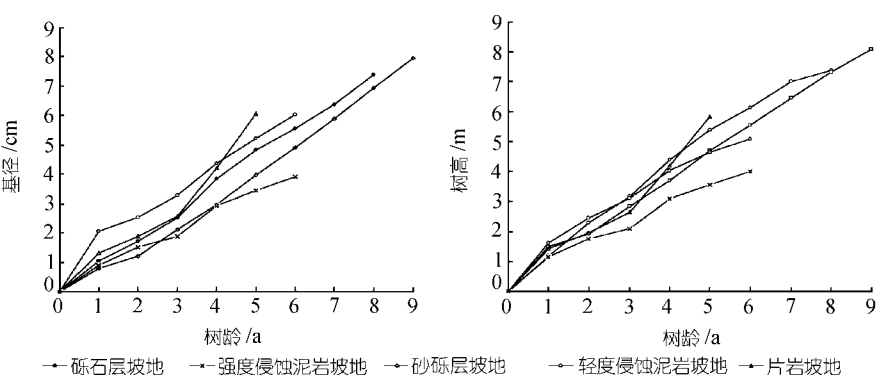


图 3 元谋干热河谷桉树基径和树高生长进程

坡地水分条件的关系. 干热河谷林木受干旱胁迫的影响较大, 在 2~5 月份的干旱季节, 严重侵蚀泥岩坡地的储水量低于无效储水量, 林木生长停止, 甚至受到干旱的生理伤害, 而石质山地的土体深层有少量有效储水供林木吸收利用, 维持其正常生理活动的水分需要.

(ii) 桉树人工林生产力及其与坡地入渗能力的关系. 表 4 为元谋干热河谷区不同岩土组成坡地的入渗速率和桉树人工林生产力. 由于林龄的差异, 在此用净生产量来表征桉树人工林生产力. 从表 4 中可看出, 不同岩土组成坡地上桉树的生产力差异较大, 分别为: 强度侵蚀泥岩坡地 $2.24 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 轻度侵蚀泥岩坡地 $3.921 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 砾石层坡地 $5.94 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 砂砾层坡地 $5.46 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 和片岩坡地 $8.44 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$. 统计分析表明, 干热河谷桉树人工林的生产力与坡地的入渗能力密切相关, 元谋干热河谷桉树人工林的叶面积指数、生物量、净生产量和叶片净同化率均与坡地的稳定入渗速率呈显著的线性相关关系(见图 4).

表 4 干热河谷不同岩土组成坡地的入渗速率和桉树人工林生产力

坡地类型	样方	入渗速率 /mm · min ⁻¹	林龄 /a	平均 树高 /m	树高生 长速率 /cm · a ⁻¹	平均 胸径 /cm	胸径生 长速率 /mm · a ⁻¹	叶面积 指数 LAI	林分 生物量 /t · ha ⁻¹	净生产量 /t · ha ⁻¹ · a ⁻¹	净同化率 /g · m ⁻² · a ⁻¹
强度侵蚀 泥岩坡地	YM23	0.63	6	4.22	70.3	3.01	5.017	1.18	13.46	2.24	190.00
轻度侵蚀 泥岩坡地	YM11	1.23	6	5.90	98.3	4.57	7.62	1.60	23.51	3.92	245.44
砾石层 坡地	YM06	2.20	8	6.63	82.9	6.11	7.64	1.63	47.51	5.94	363.52
砂砾层 坡地	YM21	6.33	10	7.88	78.8	5.81	5.81	2.21	54.60	5.46	246.97
片岩坡地	YM22	8.33	5	5.34	106.8	5.19	10.38	2.54	42.19	8.44	332.91

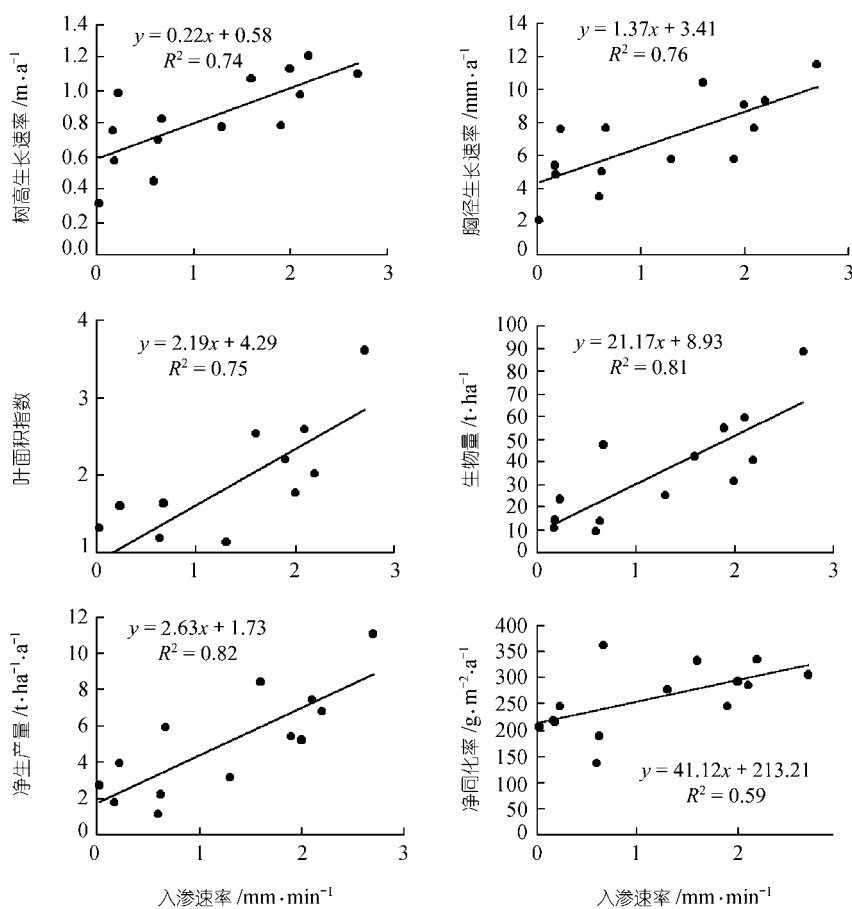


图4 热河谷桉树人工林生物量与坡地入渗速率的关系

Walter^[16]通过对荒漠的干旱地区黏质土、砂质土和裂隙发育的基岩三类岩土组成的理想地块土壤水分环境的分析后提出,在荒漠的干旱地区,高大乔木的水分供应与湿润地区相反,黏土形成了最干旱的生境,而砂土却较好的水分条件,石质土提供了最潮湿的生境而可以生长高大乔木,黏土则不能.以上调查研究结果证实了Walter的分析,在干热河谷区,土壤入渗能力强的石质山地,降雨易于渗入土体深层储存,不易蒸发损失,水分条件好,有利于高大乔木的生长,桉树人工林生物量高.而侵蚀严重的泥岩坡地则相反,不利于高大乔木的生长,桉树人工林生物量低.调查还表明,在侵蚀严重泥岩坡地上种植的桉树生长缓慢,大部分地段种植的桉树 6~10 年后长成小老头树,导致造林工作的最终失败,其研究结果将另文报道.因此,干热河谷的植被恢复应针对不同坡地类型生境的土壤水分条件,主要依靠优势生活型植物种类,进行乔-灌-草不同生活型植物类型

的合理配置,建立起植被与生境土壤水分条件的群落生态关系,方能达到成功的目的.另一方面,由于岩土性质的关系,干热河谷坡地入渗能力低是造成土壤干旱的主要原因之一.因此,增加降水入渗的造林整地措施和集流入渗的工程措施是干热河谷植被恢复的主要技术关键之一,为此作者提出了干热河谷微水造林技术^[17],并开展了相关试验工作.初步试验结果表明,此项技术改善坡面土壤水分状况,促进了林木的生长,相关成果将另文报道.

3 结论

(i) 坡地对降水的入渗能力是影响干热河谷坡地土壤水分条件和林木生长的重要因素,坡地入渗能力低是造成干热河谷土壤干旱的主要原因之一,坡地的入渗能力与坡地的岩土性质密切相关.由于岩土孔隙状况的差异,不同岩土组成坡地的入渗能力差异较大,表现为:裂隙发育片岩坡地>砂砾层坡地>砾石层坡地>轻度侵蚀泥岩坡地>严重侵蚀泥岩坡地.

(ii) 干热河谷桉树人工林的生产力与坡地的入渗能力密切相关,元谋干热河谷桉树人工林的叶面积指数、生物量、净生产量和叶片净同化率均与坡地的稳定入渗速率呈显著的线性相关关系.不同岩土组成坡地上桉树人工林生产能力的表现与入渗能力基本一致,表现为:裂隙发育片岩坡地>砾石层坡地>砂砾层坡地>轻度侵蚀泥岩坡地>严重侵蚀泥岩坡地.

(iii) 以上研究结果为干热河谷不同岩土组成坡地植被恢复的乔-灌-草配置空间模式和有效利用天然降水进行植被恢复提供了理论依据.干热河谷的植被恢复应针对不同坡地类型生境的土壤水分条件,主要依靠优势生活型植物种类,进行乔-灌-草不同生活型植物类型的合理配置,建立起植被与生境土壤水分条件的群落生态关系,方能达到成功的目的.另一方面,增加降水入渗的造林整地措施和集流入渗的工程措施是干热河谷植被恢复的主要技术关键之一.

参 考 文 献

- 1 张荣祖. 横断山区干旱河谷. 北京: 科学出版社, 1992
- 2 刘学愚. 元谋经济、社会、生态综合发展战略规划工程研究文集. 昆明: 云南大学出版社, 1980
- 3 吴征镒. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980
- 4 吴征镒. 云南植被. 北京: 科学出版社, 1987
- 5 Yang Zhong, Zhang Xinbao. in: Peishengji, Rehabilitation of Degraded Lands in Mountain Ecosystems of the Hindu Kush Himalayan Region. Proceeds of an International workshop hold in Baoshan, China. ICIMOD, Kathmanda, Nepal, 1995
- 6 张信宝, 安芷生, 陈玉德. 半干旱区植被恢复与岩土性质. 地理学报, 1998, 53(增刊), 134~140
- 7 张信宝, 陈玉德. 云南元谋干热河谷区不同岩土类型荒山植被恢复研究. 应用与环境生物学报, 1997, 3(1): 13~18
- 8 杨 忠, 张信宝, 王道杰, 等. 金沙江干热河谷植被恢复技术. 山地学报, 1999, 17(2): 152~156
- 9 杨 忠, 庄 泽, 秦定懿, 等. 元谋干热河谷水保林营造技术研究. 水土保持通报, 1999, 19(1): 38~42

- 10 杨忠, 张建辉, 徐建忠, 等. 元谋干热河谷不同岩土组成坡地桉树人工林生长特征初步研究. 水土保持学报, 2000, 14(5): 1~7
- 11 杨忠, 张建平, 王道杰, 等. 元谋干热河谷桉树人工林生物量初步研究. 山地学报, 2001, 19(6): 503~510
- 12 蒋定生, 黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究. 土壤学报, 1986, 23(4): 299~305
- 13 刘孝义. 土壤物理及土壤改良研究法. 上海: 上海科技出版社, 1982. 79~83
- 14 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科技出版社, 1978. 481~490
- 15 日本土壤物理性测定委员会. 土壤物理性测定法. 翁德衡译. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社. 1979. 675~677
- 16 Walter, H. *Vegetation of the Earth* (Second Edition). New York: Springer-Verlag New York Inc, 1979
- 17 张信宝, 杨忠, 文安邦. 微水造林, 建设攀枝花市视野区常绿森林植被. 水土保持学报, 2001, 15(4): 6~9