

岷江干旱河谷典型地段整地造林效果评估*

朱林海^{1,2} 包维楷^{1**} 何丙辉^{2**}

(¹中国科学院成都生物研究所 生态恢复重点实验室 成都 610041)
(²西南大学资源环境学院林学系 重庆 400716)

摘要 长期以来通过整地造林去恢复重建植被已在横断山区干旱河谷广为采用,然而这样的实践是否能有效提高植被覆盖率并改善土壤水源涵养能力仍不清楚.选择岷江干旱河谷3个典型地段,调查了多年(7~16 a)后整地造林地上植被覆盖、土壤物理性质以及目的造林树种岷江柏(*Cupressus chengiana* S. Y. Hu)的保存、生长与结实状况,以评价干旱河谷乡土树种造林成效及造林后的生态效果.结果表明:(1)岷江柏在栽植多年后仍有大量死亡,保存率明显下降,造林16 a后仅为38%;(2)不同年代栽植的岷江柏在造林后2~6 a即开始呈现直径年生长量下降趋势;(3)造林带内乡土植被总盖度、灌木盖度、草本盖度、地衣苔藓盖度均低于保留带,因此等高线水平沟整地造林措施未能有效促进乡土植被发育;(4)造林带土壤水分物理性质也不如保留带,整地造林也没有有效改善土壤水源涵养能力.综合分析发现,整地造林多年后岷江柏造林不仅没有达到岷江干旱河谷预期的生态恢复重建效果,甚至有加剧生态退化的趋势.因此认为:(1)规模化整地造林并不是有效的干旱河谷生态恢复和保护措施;(2)尽管岷江柏是乡土树种,但并不是干旱河谷植被恢复的适宜种.图3 表3 参29

关键词 干旱河谷; 植被恢复重建; 植被发育; 水源涵养; 造林成效; 岷江柏

CLC S728.2

Assessment on Ecological Restoration Effect of Afforestation with *Cupressus chengiana* seedlings in the Dry Minjiang River Valley, Southwestern China*

ZHU Linhai^{1,2}, BAO Weikai^{1**} & HE Binghui^{2**}

(¹ECORES Lab, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

(²Department of Forestry, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract Afforestation has long been used as an important measure to restore vegetation in the dry valley of the Hengduan Mountains with low vegetation coverage and serious soil and water loss. But due to lack of ecological assessment on long-term afforestation aftereffects, it has not been fully understood that under the condition of harsh climate and pool soil of the dry valley, whether afforestation is a promising measure in promoting ecological restoration and increasing ecological services. The present study was conducted at fifteen plots with different planting years (7~16 a) in three afforestation demonstration areas of the dry Minjiang River valley in Maoxian County, Sichuan, China, aiming at assessing the ecological results of the afforestation using native trees (*Cupressus chengiana* S. Y. Hu) by preparing the plots with contour trenches. The survival and growth of *C. chengiana* trees (including conservation rate, tree height, diameter and diameter increment process, canopy coverage, and fecundity), vegetation coverage (trees, shrubs, herbs, moss, litter and the whole), and soil physical properties (soil bulk density, water content, total porosity and water holding capability) were investigated, and then their differences across 7~16 years after afforestation were compared and analyzed. It was found that: (1) There was still a high mortality of *C. chengiana* during the 7~16 years after afforestation. The percentage of all the survived trees gradually decreased with time, and only 38% trees were alive in the 16th year after afforestation; (2) In the period of 2~6 years after afforestation the cypress trees presented the significant decline in annual diameter increment across the fifteen plots in all the three afforestation demonstration areas. (3) Compared with those in preserved belts, total vegetation cover, shrub cover, herb cover, and lichen/moss cover in sylvicultural belts were significantly lower; (4) The water-physical properties of soil in sylvicultural belts were worse than those in preserved belts. Those all displayed that *C. chengiana* plantation by preparing the plots with contour trenches could not effectively accelerate vegetation development and improve water and soil conservation, and would fail to achieve the expectant result for ecological restoration, even inducing ecological degradation in the dry Minjiang River valley ecosystem. Therefore, it is concluded that the afforestation by preparing the plots with contour trenches is not a promising

收稿日期: 2008-12-12 接受日期: 2009-04-17

*中国科学院知识创新工程项目 (No. KZCX2-XB2-02) 资助 Supported by the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-XB2-02)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: baowk@cib.ac.cn; hebinghui@yahoo.com.cn)

measure and *C. chengiana*, a native plant endemic to this dry valley, is not suitable for ecological restoration in the dry valley region. Fig 3, Tab 3, Ref 29

Keywords afforestation; dry Minjiang River valley; vegetation restoration; ecological assessment; *Cupressus chengiana*
CLC S728.2

干旱河谷是青藏高原一类特殊的山地生态系统, 主要分布于金沙江、怒江、澜沧江和雅砻江中下游, 大渡河和元江中游, 岷江和白水江上游等河谷区。特殊的地质地貌与干燥的气候使干旱河谷具有高度的生态脆弱性, 在人为与自然干扰作用下山地生态系统易于失衡而退化^[1-3]。目前干旱河谷的突出问题是植被覆盖率低, 水土流失严重, 生态恶化形势严峻^[2]。因此, 恢复重建植被、提高植被覆盖率、防治水土流失、保护脆弱的山地生态环境是干旱河谷地区生态建设的一项紧迫任务, 是国家和区域生态建设的重大需求之一。干旱河谷地区也一直是近30 a来国家重要生态工程(如长江上游水土流失治理工程、防护林工程、退耕还林工程)实施的重点地段之一^[3]。

过去30 a来, 关于干旱河谷的植被恢复重建, 已在目的树种筛选、整地方式、施肥、早期抚育和保水措施等方面作了大量工作^[2, 4-12]。保留带与造林带沿等高线交替配置、水平沟整地后在造林带内进行植树造林的恢复措施(以下简称“等高线水平沟整地造林”)在元江流域南涧^[7, 12]、金沙江流域元谋^[8-9]和岷江上游^[5-6]等干旱河谷地区一直广泛应用于生态恢复重建, 也在国家生态工程建设中得到一定的应用和推广。对干旱河谷内造林初期(造林后2 a)的效果评估已发现, 岷江柏(*Cupressus chengiana* S. Y. Hu)等针叶树种具有较强的抗旱能力, 因此造林成活率较高^[11]。整地可提高土壤含水量, 且水平沟整地优于短册状整地和穴状整地^[5-7]。然而, 这些短期的评估难以说明长期的生态效果, 造林整地后的长期效应一直缺乏必要的研究。传统的整地造林多年后的成效如何? 是否促进了植被的发育? 是否改善了土壤的质量? 这些基本的问题均还缺乏必要的监测与评价, 传统的通过造林去重建森林^[13-14]是否能有效促进干旱河谷植被覆盖率的提高与土壤功能的改善还不清楚。干旱河谷植被恢复重建过程中, 传统造林实践效果的评估是认识干旱河谷可恢复性以及恢复能力的重要途径, 可为恢复重建干旱河谷植被、科学有效保护干旱河谷提供理论支撑和实践基础。

由于干旱河谷内土壤水分是限制土壤潜在肥力向有效性肥力转化、影响群落物种数量结构的格局分布的主导因子^[15]。同时, 提高植被覆盖率是干旱河谷植被恢复重建最重要的目标之一。因此, 本研究除采用岷江柏等树种的存活与生长状况作为评价指标外, 将植被盖度和土壤物理性质也作为评价指标。通过调查岷江干旱河谷茂县境内岷江柏为主要造林树种的3个典型地段造林多年(7~16 a)后保留带和造林带3个指标的变化情况, 评估传统的等高线水平沟整地造林多年后植被恢复重建的生态效果和造林成效。具体回答3个基本问题: (1) 造林多年后的岷江柏等树种保存与生长率是否是下降的? (2) 造林多年后植被覆盖率是否得到有效提高? (3) 高强度的等高线水平沟整地多年后土壤水源涵养能力是否有所改善? 如果这些问题是否定的, 我们可以基本肯

定在岷江干旱河谷区依靠造林去恢复植被并控制水土流失将是失败的。因此研究结果将有助于认识恶劣环境条件下造林整地措施的有效性, 对于当前干旱河谷区生态恢复实践具有重要指导意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域与样地概况

研究地点位于四川省阿坝藏族羌族自治州茂县(103°41'48.1"~103°43'22.0" E, 31°49'10.1"~31°52'33.0" N), 属于岷江上游干旱河谷区, 地处青藏高原东南边缘深切切割区, 是典型的高山峡谷地貌类型^[15]。属高原季风气候, 焚风效应显著, 干湿季分明, 风大风频, 年平均风速4.2 m s⁻¹。该地区≥10℃积温3 293.3℃, 年均温11.2℃; 最高温度一般出现在7月, 极端最高温32.0℃; 最低气温一般出现在1月, 极端最低温-11.6℃; 由于焚风效应, 气温明显高于其他同海拔地区。降水的年际变化很大, 季节分配严重不均, 年降水量493 mm, 蒸发量1 332 mm, 蒸发量远高于降水量(约为2.7倍)。全年日照时数1 565.9 h, 全年太阳辐射42.26×10⁸ J m⁻²。土壤以褐土为主, 有少量的新积土分布于沟谷谷底两侧, 土层浅薄, 富含砾石, 因此土壤干燥, 潜在肥力高, 有效肥力低。干旱河谷植被以灌丛为优势群落, 主要优势种为蕨(*Caryopteris* spp.)、小花滇紫草(*Onosma farrerii*)、川甘亚菊(*Ajania potaninii*)、小叶杭子梢(*Campylotropis wilsonii*)、小马鞍羊蹄甲(*Bauhinia faberi* var. *microphylla*)、白刺花(*Sorophora davidi*)、刺旋花(*Convolvulus tragacanthoides*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、四川黄栌(*Cotinus coggygria*)、檀子栎(*Quercus baronii*)等, 主要植物种类具有多刺、多毛、小叶、质厚、低矮或匍匐生长等适应旱生的形态特征^[2]。

1.2 样地选取

在查阅相关造林历史记录与实地调查访问的基础上, 选取岷江干旱河谷茂县段3个典型造林地段飞虹、野鸡坪、两河口进行调查, 这些地段均为国家生态工程项目实施地段。3个地段整地方式均为等高线水平沟整地, 初植树种均为岷江柏, 苗木年龄均为2 a。样地的编号由地名全拼的首字母和阿拉伯数字组成。

飞虹造林地段(FH)位于东坡, 海拔1 600~2 200 m, 主要保存树种为岷江柏、侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等。岷江柏初植密度2 500 ind hm⁻²。保留带宽1.3~2.4 m, 造林带宽1.5~2.1 m。

野鸡坪造林地段(YJP)位于西坡, 海拔1 700~2 000 m, 主要保存树种为岷江柏、元宝槭(*Acer truncatum*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)等。岷江柏初植密度2 000 ind hm⁻²。保留带宽1.5~4.4 m, 造林带宽1.0~1.9 m。

两河口造林地段(LHK)位于西坡, 海拔1 600~1 750 m, 主要保存树种为岷江柏、臭椿(*Ailanthus altissima*)、刺槐等。

岷江柏初植密度2 000 ind hm⁻². 保留带宽2.6~3.2 m, 造林带宽1.3~1.4 m.

在3个地段根据造林地的面积大小、地形、植被等因素, 分别设置了5个、8个和2个共15个样地用于目的造林树种的保存与生长、植被发育与土壤物理性质调查取样. 各样地的基本情况见表1.

表1 岷江干旱河谷整地造林长期(7~16 a)效果评估样地概况
Table 1 Some fundamental information of plots for long-term (7~16 a) restoration effect evaluation on afforestation with plot preparation in the dry Minjiang River valley

样地编号 Plot	岷江柏年龄 Age of <i>C. chengiana</i> (t/a)	造林时间 Time after aforestation (t/a)	海拔 Altitude (h/m)	坡向 Aspect (β/°)	坡度 Slope (α/°)
FH-01	18	16	2086	NE 67	19
FH-02	17	15	1858	NE 67	9
FH-03	16	14	1899	NE 72	15
FH-04	15	13	1854	NE 31	34
FH-05	18	16	1795	SE 85	28
YJP-01	10	8	1758	NW 90	15
YJ-02	10	8	1776	NW 89	27
YJP-03	10	8	1765	SW 84	24
YJ-04	9	7	1775	NW 38	36
YJP-05	10	8	1760	SW 33	18
YJP-06	9	7	1881	NW 84	37
YJP-07	10	8	1886	NW 73	36
YJP-08	9	7	1884	SW 77	29
LHK-01	10	8	1698	SW 29	32
LH-02	10	8	1662	SW 29	24

1.3 植被调查与土壤取样

首先, 明确每个样地的恢复历史, 记录样地的植被、地形、土壤等基本特征. 然后在每个样地上分别设置1个20 m×20 m的样方, 每木调查造林树, 记录岷江柏的高度、基径、冠径(沿等高线、垂直于等高线)和枝下高等. 同时记录空穴、已枯树木、存活树木、结实树木的数量以及每株结实树木的结实量. 然后, 在每个样地内选取5株长势最好的岷江柏, 采伐后将主干带回室内后以20 cm为1个区分段截取圆盘, 圆盘经过打磨后, 采用WinDENDRO™2002b年轮分析系统进行年轮定年和直径测量, 用于直径生长量分析.

在20 m×20 m的样方内分别选取3条造林带和3条保留带, 在每条造林带和保留带内分别设置1条20 m的样线. 考虑到造林带、保留带的宽度限制以及河谷内灌丛冠幅相对较小的特点, 在每条样线上每隔2 m机械设置7个1 m×1 m的小样方, 用于植被和凋落物的盖度调查. 即每个样地内在造林带和保留带中分别调查21个小样方, 共42个小样方. 在每个小样方中, 调查植被总盖度、然后分目的造林树(造林带)、灌木、草本、地衣苔藓、凋落物分别进行分盖度估计, 其中将蒿、蕨等半灌木归入灌木调查.

在20 m×20 m样方内分别在距离树木20 cm处、造林带内两株相邻树木的中间、造林带边缘土埂处、保留带下部未扰动处4个位置10~20 cm土层内各取3个环刀和3个铝盒用于土壤容重、饱和含水量、毛管含水量、总孔隙度、毛管孔隙度、自然含水量的分析. 取样前, 研究区域内至少半个月未降雨. 因此, 能够代表干旱河谷土壤的一般状况. 各物理性质的测

定采用常规方法^[19-20]. 饱和水测定时浸水24 h, 浸水深度距环刀上缘1 cm左右. 毛管水测定时将环刀置于干沙上面2 h. 土壤水分测定在105 °C烘箱内下烘8 h.

1.4 数据整理与统计分析

以样地为单元, 统计各样地造林树种总的保存率、总的保存密度和岷江柏的保存密度. 其计算方法分别见公式①、②、③. 生长指标方面, 计算了各样地内岷江柏的高度、地径、冠径及年生长量和枝下高, 并统计了岷江柏的结实情况. 同时, 利用WinDENDRO™2002b年轮分析系统对每个圆盘4个不同的方向进行年轮定年和直径测量后, 先计算各圆盘直径年生长量, 再利用圆盘直径年生长量计算单株树木直径年生长量, 然后利用同一样地内的单株树木直径年生长量计算该样地内岷江柏直径年生长量. 最后, 利用相同时间造林的样地的岷江柏直径年生长量平均值绘制生长曲线.

采用植被盖度的相对变化率来衡量造林带植被盖度相对于保留带的变化, 其计算方法见公式④. 因此, 正数表示造林带植被盖度相对于保留带减少, 负数表示增加. 各样地植被盖度的相对变化率用同一样地内造林带和保留带各盖度值的平均值计算.

$$\text{造林树种总保存率} = \frac{\text{存活树木总数量}}{\text{存活树木总数量} + \text{空穴数} + \text{枯死树木数量}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{造林树种总保存密度} = \frac{\text{存活树木总数量}}{\text{样方面积}} (\text{ind hm}^{-2}) \quad (2)$$

$$\text{岷江柏保存密度} = \frac{\text{存活的岷江柏数量}}{\text{样方面积}} (\text{ind hm}^{-2}) \quad (3)$$

$$\text{植被盖度的相对变化率} = \frac{\text{保留带植被盖度} - \text{造林带植被盖度}}{\text{保留带植被盖度}} \times 100\% \quad (4)$$

在SPSS 12.0中利用One-Way ANOVA过程分析了造林时间对造林带植被盖度的影响, 利用Independent-Samples T Test过程比较了同一样地内造林带和保留带植被盖度的差异以及3个取样地段内造林带和保留带土壤物理性质的差异. 土壤物理性质比较时, 将造林带内3个位置的土样作为一个整体, 再与保留带下部的土样进行比较.

2 结果与分析

2.1 造林树种的保存与生长状况

对造林树种保存状况的分析(表2)表明, 造林树种总保存率随造林时间增加呈现下降趋势, 而造林树种总保存密度和岷江柏保存密度没有明显的变化. 造林树种总保存率、造林树种总保存密度和岷江柏保存密度均以13 a造林地段为最高, 16 a造林地段为最低.

对岷江柏生长状况的分析(表2)表明, 造林较早的地段(13 a、14 a、15 a和16 a)岷江柏株高、地径和冠径要大于造林较晚的地段(7 a和8 a), 但是16 a造林地段的岷江柏株高年生长量和地径年生长量与7 a和8 a造林地段没有显著区别. 不同年份造林地段间冠径年生长量和枝下高差异不大.

进一步研究不同时间栽植的岷江柏直径年生长量及其过程(图1)发现, 不管林地造林时间, 所栽植的岷江柏直径年生长量均表现为先增加后降低的变化趋势, 其最大值分别出现在造林后2~6 a.

同时, 对15个样地岷江柏的结实统计显示, 研究区域内

表2 岷江干旱河谷坡地造林7~16 a后岷江柏的生长与保存状况
Table 2 Growth and survival of the planted *C. chengiana* trees in different years (7~16 a) after afforestation on slopelands in the dry Minjiang River valley, Southwestern China

造林时间 Afforestation time (t/a)		7	8	13	14	15	16
造林树种总保存率 Percentage of all survived trees (P/%)		65	65	76	60	46	38
造林树种总保存密度 Density of all survived trees (n/ind hm ⁻²)		1367	1186	1800	1500	1500	600
岷江柏保存密度 Density of survived <i>C. chengiana</i> trees (n/ind hm ⁻²)		1000	900	1350	1100	1100	600
岷江柏生长状况 Growth status of <i>C. chengiana</i> trees	株高 Height (h/cm)	97	100	127	379	236	186
	株高年生长量 Annual growth of height (h/cm a ⁻¹)	11	10	8	24	14	10
	地径 DGH (D/cm)	2.67	2.68	4.65	9.90	8.16	5.07
	地径年生长量 Annual growth of DGH (D/cm a ⁻¹)	0.30	0.27	0.31	0.62	0.48	0.28
	冠径 Canopy diameter (D/cm)	56	52	70	115	125	76
	冠径年生长量 Annual growth of canopy diameter (D/cm a ⁻¹)	8	7	5	8	8	5
	枝下高 Height under branch (h/cm)	6	9	6	10	8	9

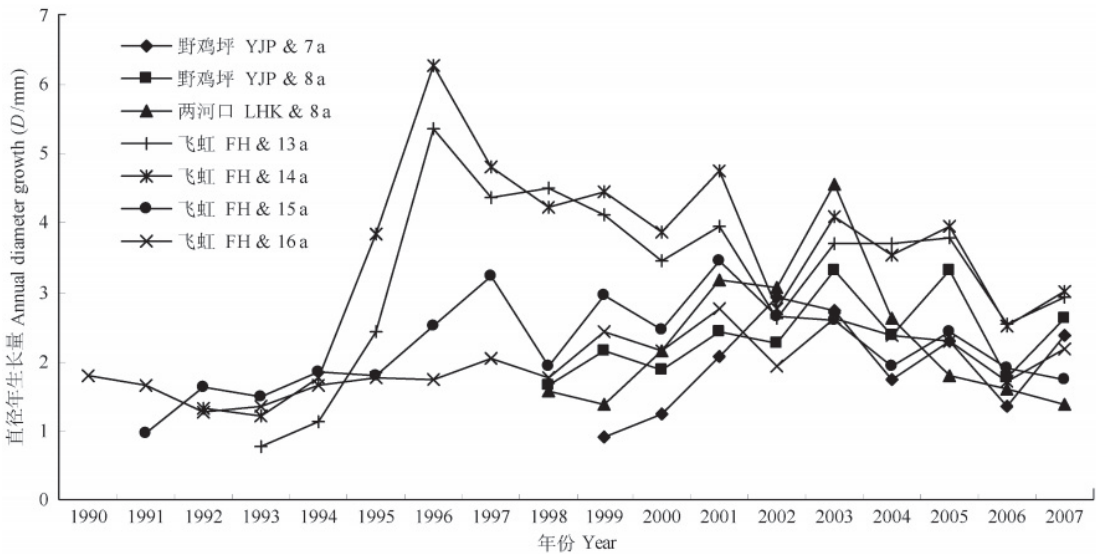


图1 岷江干旱河谷3个造林地段岷江柏苗木栽培后的直径年生长变化
Fig. 1 Change in diameter increment of the planted *C. chengiana* seedlings in three afforestation areas from 1990 to 2007
YJP: 野鸡坪造林区; LHK: 两河口造林区; FH: 飞虹造林区. 下同. 各序列用取样地点加造林时间的形式命名, 生长年限为造林时间加2
YJP: Yeijing afforestation demonstration area; LHK: Lianghekou afforestation demonstration area; FH: Feihong afforestation demonstration area. The same below

岷江柏最早结实年龄小于10 a. 在LHK-01、FH-01、FH-02和FH-04等4个样地分别有8株(19%)、5株(9%)、5株(11%)、3株(12%)岷江柏结实, 各样地结实球果总量分别为98颗、42颗、34颗、10颗. 4个样地内岷江柏生长时间分别为10 a、18 a、17 a、15 a.

2.2 植被盖度的时空差异性

图2显示不同造林时间的造林带内植被各盖度随时间的变化趋势. 可以看出, 随着时间的推移, 造林带内树木盖度和凋落物盖度显著增加, 但灌木盖度和草本盖度显著减少, 植被总盖度和地衣苔藓盖度变化不明显. 对不同时间造林的地段各植被盖度的单因素方差分析表明, 15 a和16 a造林地段树木盖度显著大于7 a和8 a造林地段, 14 a、15 a和16 a造林地段的凋落物盖度也显著大于7 a和8 a造林地段. 7 a造林地段灌木盖度显著大于14 a、15 a和16 a造林地段, 7 a、8 a和13 a造林地段草本盖度极显著大于15 a和16 a造林地段. 13 a和14 a造林地段植被总盖度极显著大于8 a造林地段.

对同一样地内造林带和保留带植被盖度的比较发现, 等高线水平沟整地造林后, 除凋落物盖度外其他盖度均表现出

明显的减少趋势(图3). 其中, 灌木盖度减少最为明显, 其次依次为地衣苔藓盖度、植被总盖度、草本盖度. 同时, 在3个地段中, 野鸡坪造林后植被盖度的减少趋势较为明显. 只在个别样地内草本盖度出现了显著增加, 增加率甚至达到了3倍(LHK-02). 在15个样地中, 分别有11、14、9、13和7个样地造林带植被总盖度、灌木盖度、草本盖度、地衣苔藓盖度和凋落物盖度小于保留带, 且分别有5、13、4、8和5个样地显著或极显著小于保留带.

2.3 造林带和保留带土壤物理性质的差异

表3显示3个取样地段造林带和保留带之间土壤物理性质的差异性. 总的来说, 造林带土壤自然含水量、饱和含水量、毛管含水量、总孔隙度均小于保留带, 而造林带土壤容重和毛管孔隙度要大于保留带. 3个取样地段中, 两河口造林带和保留带之间的差异更为明显, 其次依次为飞虹和野鸡坪.

3 讨论

3.1 造林多年后岷江柏的保存与生长状况

郑绍伟等(2007)调查发现, 造林2 a后岷江柏在岷江干

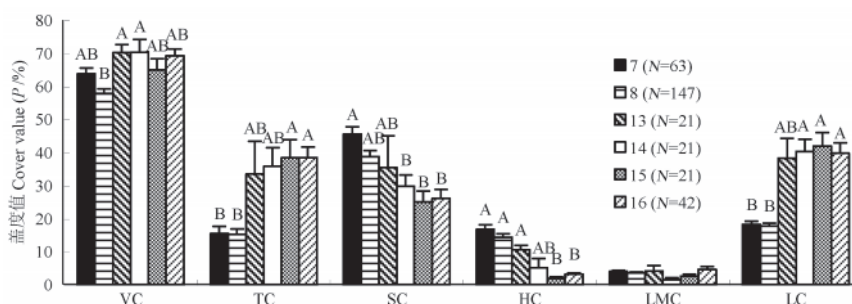


图2 岷江干旱河谷不同时间造林后的种植带植被盖度比较

Fig. 2 Comparison of different vegetation component covers of sylvicultural belts after afforestation for 7~16 a in the dry Minjiang River valley VC、TC、SC、HC、LMC和LC分别表示植被总盖度、树木、灌木、草本、地衣苔藓和凋落物分盖度. 大写字母表示不同造林时间(a)之间差异极显著, 误差线表示标准误差 VC、TC、SC、HC、LMC and LC denote total vegetation cover, tree cover, shrub cover, herb cover, lichen and moss cover, and litter cover, respectively. Capital letters indicate extremely significant difference among times after afforestation. Bars are ± 1 standard errors

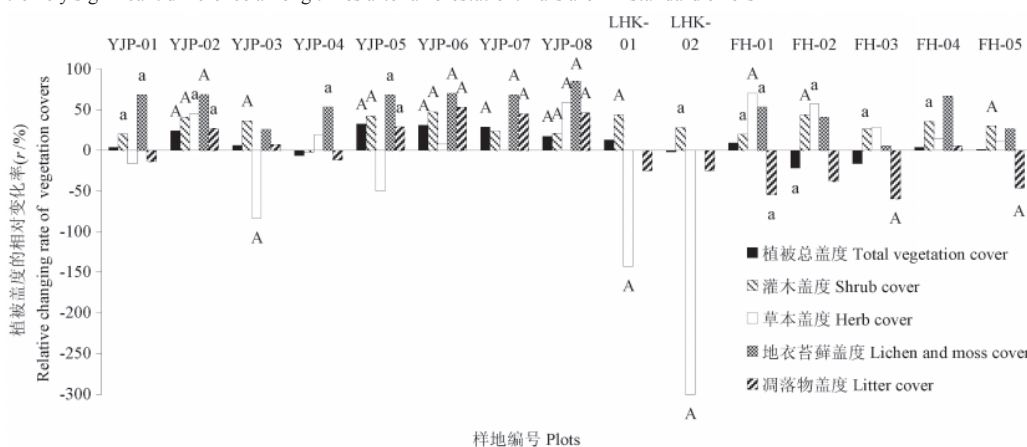


图3 岷江干旱河谷地段等高线水平沟整地造林后植被盖度的相对变化率

Fig. 3 Relative changing rate of vegetation covers after afforestation by preparing plots with contour trenches in the dry Minjiang River valley 图中字母代表同一样地内保留带与造林带植被盖度独立样本 t -检验结果, “A”和“a”分别代表造林带植被盖度相对于保留带极显著($P=0.01$)或显著($P=0.05$)的增加(横坐标轴下方)或减少(横坐标轴上方) The letters “A” and “a” show extremely significant ($P=0.01$) and significant ($P=0.05$) increase (under horizontal coordinate) or decrease (above horizontal coordinate) of vegetation covers in sylvicultural belts in comparison with those in preserved belts of same plots, which resulted from the Independent-Sample T Test by SPSS 12.0

旱河谷内的造林成活率为89.6%^[11];但是,本研究中6个造林时间的样地造林树种总保存率最高仅为76%,最低只有38%(表2),造林树种总保存率呈现为下降趋势(表2),表明岷江柏后期死亡较为严重,岷江柏尽管是乡土树种,但在岷江干旱河谷内的存活状况较差,短期的评估对于造林效果的评估并不有效.同时,郑绍伟等也指出造林2 a后岷江柏地径年生长量为0.39 cm^[11];而本研究中有4个年份造林样地岷江柏地径年生长量低于0.39 cm,只有两个造林时间的样地高于0.39 cm(表2),且不同时间造林年份的岷江柏直径年生长量在生长2~6 a后均开始下降(图1),说明短期的造林评估并不能可靠说明岷江干旱河谷造林成效.岷江柏最早结实年龄一般为13 a^[21],但造林地10 a生岷江柏(造林后8 a)就已结实,说明乡土树种岷江柏在岷江干旱河谷造林后出现早熟并提前结实,表明当前岷江干旱的生态环境不能满足岷江柏正常完成生活史.对造林后岷江柏长期保存率、生长量、高生长过程、结实情况等综合分析都表明,在岷江干旱河谷内3个地段,岷江柏存活生长仍然处于胁迫状态,已发展为“小老头树”,岷江柏并不是岷江干旱河谷植被恢复与造林的理想树种.

岷江柏适于生长在温度适中、雨量充沛、蒸发量小、干燥系数小、太阳辐射较优的环境中,总蒸发量、生长季蒸发量和干燥系数是影响岷江柏生长的主要气象因子^[23].尽管岷江柏是研究区域的乡土树种,但由于河谷自然环境变化大,降水量小,蒸发量大,气候干旱,土壤含水量较低^[2, 10],空间异质性强(表3),随着个体增长和发育,岷江柏已不能很好地适应干旱河谷现有气候、土壤条件,因此存活和生长状况较差.

3.2 等高线水平沟整地造林对乡土植被发育的影响

干旱河谷环境恶劣,提高植被覆盖率、促进植被发育是生态恢复的关键目标之一.然而,我们的调查表明,由于生境制约,造林林木生长缓慢,通过造林增加的林木盖度十分有限(表2);进一步而与保留带相比,整地造林显著破坏了种植带内原有的乡土植被覆盖,多年(7~16 a)后的植被覆盖率仍然未能恢复到保留带的覆盖水平;尽管造林带内植被总盖度随造林时间的变化不大,但是除凋落物盖度外大多数样地内造林带各植被盖度低于保留带(图3).这表明,岷江干旱河谷内的等高线水平沟整地造林并没有促进植被的发育,未

表3 保留带、造林带土壤物理性质比较
Table 3 Differences in soil physical properties between preserved belts and sylvicultural belts

取样地点和位置 Plot location		野鸡坪 YJP		两河口 LHK		飞虹 FH	
		SB	PB	SB	PB	SB	PB
自然含水量	均值Mean±SE	6.81±0.31	7.52±0.53	7.07±0.50	6.13±1.40	9.00±0.64	9.47±0.35
Natural moisture capacity (w/%)	差异显著性 Significance level	NS		NS		NS	
容重	均值Mean±SE	1.23±0.02	1.14±0.04	1.47±0.03	1.36±0.03	1.19±0.04	1.05±0.04
Bulk density ($\rho/\text{g cm}^{-3}$)	差异显著性 Significance level	NS		*		*	
饱和含水量	均值Mean±SE	38.61±0.80	39.80±1.75	35.78±1.29	39.52±0.92	41.92±1.47	44.75±2.84
Saturated moisture capacity (w/%)	差异显著性 Significance level	NS		*		NS	
毛管含水量	均值Mean±SE	33.21±0.70	36.46±1.87	30.48±1.58	35.28±0.84	36.44±1.36	39.96±2.61
Capillary moisture capacity (w/%)	差异显著性 Significance level	NS		*		NS	
总孔隙度	均值Mean±SE	53.65±0.83	56.94±1.48	44.49±1.04	48.72±1.13	55.04±1.67	60.41±1.60
Total porosity (%)	差异显著性 Significance level	NS		*		*	
毛管孔隙度	均值Mean±SE	41.70±0.56	40.79±1.63	44.28±1.56	47.65±1.04	42.87±1.91	41.13±2.74
Capillary porosity (%)	差异显著性 Significance level	NS		NS		NS	

SB、PB分别代表造林带和保留带。“*”、“NS”分别代表造林带和保留带之间土壤物理性质显著差异和没有差异

“SB” and “PB” represent sylvicultural belts and preserved belts, respectively. “*” and “NS” indicate significant and non-significant differences of soil physical properties between sylvicultural belts and preserved belts

能有效提高植被覆盖率,相反由于整地移除了原有灌、草、地衣苔藓等植被,而干旱河谷特殊的土壤气候条件又使其在短时间内难以恢复,其总的植被覆盖率呈下降趋势。表2、图3也表明,整地移除了原有植被和表土层,这种干扰的强度超过干旱河谷植被自然恢复能力,导致土壤物理性指标衰退(表3),引起新的环境退化,岷江干旱河谷植被恢复缓慢。因此,在干旱河谷恶劣的环境条件下,任何生态措施应当以保护植被更新能力为前提,将干扰降低到最低水平^[3],这样的恢复措施才可能真正有效。

3.3 等高线水平沟整地造林对土壤物理性质的影响

岷江干旱河谷内,等高线水平沟整地造林没有有效地改善土壤物理性质,从而提高土壤的水源涵养能力;相反,与保留带相比,造林带土壤物理性质呈现出退化的趋势(表3)。过去的研究^[5-6, 22, 24]表明,整地可以提高土壤的含水量。但是,造林后随着树木的生长,一般整地对土壤物理性质的改善可能会逐渐消退^[25]。刘长利等(1989)对辽东半岛中南部低山丘陵地带石质山地造林整地技术的研究表明,造林5 a后,水平沟已丧失了改善土壤物理性质的作用^[26]。同时,也有研究指出,传统的整地方式会导致生态系统严重的水土流失和养分含量的下降^[27]。岷江干旱河谷利用等高线水平沟整地造林的初期在一定程度上起到拦截降水的作用,从而改善土壤水分-物理性质^[5-6]。但是,由于造林带植被盖度相对于保留带较低,造成造林带内温度和光照强度均高于保留带^[29],加之干旱河谷本身蒸发强烈(茂县干旱河谷年蒸发量大约为降水量的2.7倍)和树木的蒸腾作用强烈,最终形成造林带内强烈的蒸散作用,造成在干旱河谷内整地造林不能起到改善土壤水分-物理性质的作用,相反却加剧了土壤的干化。调查中还发现,岷江干旱河谷内土壤裸露处易形成物理结皮,导致了水分入渗量减少和地表径流量增加,并限制植物萌发和出苗,影响植被发育。

干旱河谷植被恢复过程中,造林树种生长、植被发育和土壤质量之间相互作用。气候干旱与土壤的水分缺乏和养分贫瘠是造林树生长和植被发育较差的一个原因,树木通过

自身的生长和对下层植被的影响作用于植被的发育,树木生长和植被发育又是影响土壤质量改善的重要因素。高强度的整地作为人为措施破坏了自然植被,扰动了土壤,加速了土壤水分和养分的流失,最终限制了造林树种的生长和植被的发育。随着造林树种的生长,其蒸腾作用逐渐加强,进一步加剧了土壤的干化,反过来限制了其自身的生长。

综合分析表明,选择乡土树种岷江柏等高线水平沟整地后造林未能取得理想的干旱河谷植被恢复效果,长期(7~16 a)以来,岷江柏未能适应干旱河谷现有的土壤、气候条件,不仅保存状况较差,保存率低且呈下降趋势,无论高生长还是直径生长都表现出下降趋势,也出现提前结实现象,成为“小老头树”;而同时,等高线水平沟整地的造林恢复措施也没有促进植被盖度提高与土壤水源涵养能力改善,相反却降低了造林带植被覆盖率,恶化了土壤质量。因此,整地造林不仅没达到岷江上游干旱河谷植被恢复预期的效果,甚至有加剧系统退化的趋势,并不是有效的生态恢复和保护措施,应放弃。水资源状况是干旱河谷植被恢复重建必须首先考虑的问题,高强度的整地措施和栽植蒸腾作用较强的林木会加剧土壤的干旱化,也不利于植被的发育和林木的生长。同时,考虑到植物间的竞争和干旱河谷土壤水分含量较低,干旱河谷植被恢复中,人工干预措施的使用应特别谨慎。今后,河谷内的植被恢复应在明确其影响因子和机理的基础上,尽量减少高强度的人为干扰,筛选灌草等乡土植物作为目的植物,通过促进自然植被恢复更新和发育,提高植被盖度,改善土壤质量,最终实现植被和土壤的良性发展。

致谢 中国科学院茂县山地生态系统定位研究站提供了气象数据、野外调查和室内样品分析测定条件。李芳兰、吴福忠、周志琼、庞学勇和闫晓丽对论文修改提出了有益建议。本研究也得到中国科学院山地生态恢复与生物资源利用重点实验室与生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室的支持。

References

- 1 Zhang RZ (张荣祖). Dry Valley in Hengduan Mountains. Beijing, China (北京): Science Press, 1992

- 2 Wu N (吴宁), Liu Q (刘庆). Restoration and Reconstruction of Degraded Mountain Ecosystem on the Upper Minjiang River. Chengdu, China (成都): Sichuan Publishing House of Science & Technology, 2007
- 3 Bao WK (包维楷), Chen QH (陈庆恒), Liu ZG (刘照光). Degradation of mountain ecosystem in the upper reaches of Minjiang River and countermeasures for their rehabilitation and reconstruction. *Resour & Environ Yangtze Valley* (长江流域资源与环境), 1995, **4** (3): 277~282
- 4 Wu ZX (吴宗兴). Study on cultivating technology of experiment forest in the arid valley of the upper Minjiang River. *J Sichuan For Sci & Technol* (四川林业科技), 1993, **14** (2): 50~53
- 5 Wu ZX (吴宗兴), Liu QL (刘千里), Huang Q (黄泉), Wang M (汪明), Wang JH (王俊华), Duan Q (段琼), Huang XJ (黄晓江). Experiments with the introduction and cultivation of *Pinus radiata* D. Don in the upper reaches of the Minjiang River, Sichuan Province, China. *J Sichuan For Sci & Technol* (四川林业科技), 2005, **26** (3): 1~10
- 6 Wu ZX (吴宗兴), Liu QL (刘千里), Huang Q (黄泉), Wang M (汪明), Wang JH (王俊华), Duan Q (段琼), Huang XJ (黄晓江). Experiments with the site-preparation afforestation of *Pinus radiata* D. Don in arid areas. *J Sichuan For Sci & Technol* (四川林业科技), 2006, **27** (2): 11~16
- 7 Liu WY (刘文耀), Liu LH (刘伦辉), Qiu XZ (邱学忠), Zhao XN (赵学农). Experimental studies on ways of water storage and vegetation restoration in dry-hot degenerative mountainous area in Nanjian, Yunnan. *J Nat Resour* (自然资源学报), 1995, **10** (1): 35~42
- 8 Yang Z (杨忠), Zhang Z (庄泽), Qin DY (秦定懿), Ran GF (冉国富), Fu WX (付文喜). Afforestation techniques for water conservation in arid-hot valleys of Yuanmou County. *Bull Soil & Water Conserv* (水土保持通报), 1999, **19** (1): 38~42
- 9 Yang Z (杨忠), Zhang XB (张信宝), Wang DJ (王道杰), Chen YD (陈玉德). Vegetation rehabilitation in the arid-hot valleys of Jinshajiang River. *J Mount Sci* (山地学报), 1999, **17** (2): 152~156
- 10 Wang CM (王春明), Sun H (孙辉), Chen JZ (陈建中), Chen KM (陈克明). Effects of absorbent polymers on soil moisture conservation for reforestation in dry valleys. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2001, **7** (3): 197~200
- 11 Zheng SW (郑绍伟), Li YQ (黎燕琼), Yue YJ (岳永杰), Chen H (陈泓), Liu XL (刘兴良), Mou CL (慕长龙). A study of forestation experimentation in arid valley areas of the Minjiang River. *J Sichuan For Sci & Technol* (四川林业科技), 2007, **28** (1): 56~59, 70
- 12 Li K (李昆), Hou KW (侯开卫), Zhang ZJ (张志钧), Hou B (侯彬). Techniques for afforestation in the extremely degenerative mountainous land of dry and hot area in Nanjian, Yunnan Province. *For Res* (林业科学研究), 1998, **11** (2): 208~213
- 13 Zhang XB (张信宝), Chen YD (陈玉德). Study on vegetation rehabilitation on the slopes of the arid and hot valleys in Yuanmou, Yunnan. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 1997, **3** (1): 13~18
- 14 Zhou L (周麟). Initial study on vegetation rehabilitation in Yuanmou dry-hot valley. *Acta Bot Bor-Occid Sin* (西北植物学报), 1998, **18** (3): 450~456
- 15 Wang CM (王春明), Bao WK (包维楷), Chen JZ (陈建中), Sun H (孙辉), Xie JS (谢家穗). Profile characteristics and nutrients of dry cinnamon soils in dry valley of the upper Minjiang River. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2003, **9** (3): 230~234
- 16 Zhang WH (张文辉), Lu T (卢涛), Ma KM (马克明), Zhou JY (周建云), Liu SL (刘世梁). Analysis on the environmental and spatial factors for plant community distribution in the arid valley in the upper reach of Minjiang River. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2004, **24** (3): 552~559
- 17 Ruiz-Jaén MC, Aide TM. Vegetation structure, species diversity, and ecosystem processes as measures of restoration success. *For Ecol Manage*, 2005 (218): 159~173
- 18 Diemont SAW, Martin JF, Levy-Tacher SI, Nigh RB, Lopez PR, Golicher JD. Lacandon Maya forest management: Restoration of soil fertility using native tree species. *Ecol Engin*, 2006, **28** (3): 205~212
- 19 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science (中国科学院南京土壤研究所). Soil Physical and Chemical Property Analysis. Shanghai, China (上海): Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1978
- 20 Zhang WR (张万儒), Yang GY (杨光滢), Tu XN (屠星南), Zhang P (张萍). LY/T 1215-1999 Determination of forest soil water-physical properties
- 21 Bai KS (白昆声), Wu ZB (吴中北), Mei JJ (梅炯杰), Li JG (李炯光). 岷江柏木调查研究. *Central South For Inventory & Planning* (中南林业调查规划), 1990 (2): 43~49
- 22 Fleming RL, Black TA, Eldridge NR. Effects of site preparation on root zone soil water regimes in high-elevation forest clearcuts. *For Ecol & Manage*, 1994, **68** (2~3): 173~188
- 23 Pang XY (庞学勇), Bao WK (包维楷). Analysis of growth condition and climate factors in different geographical population of *Cupressus chengiana*. *Ecol & Environ* (生态环境), 2005, **14** (4): 466~472
- 24 Querejeta JI, Roldán A, Albaladejo J, Castillo V. Soil water availability improved by site preparation in a *Pinus halepensis* afforestation under semiarid climate. *For Ecol & Manage*, 2001 (149): 115~128
- 25 Sutinen R, Pääntäjä M, Teirilä A, Sutinen M. Effect of mechanical site preparation on soil quality in former Norway spruce sites. *Geoderma*, 2006 (136): 411~422
- 26 Liu CL (刘长利), Sun MQ (孙美清), Wang QL (王庆禄). An investigation on the technique of soil preparation of forestation in rocky hill areas. *Sci Silv Sin* (林业科学), 1989, **25** (3): 263~267
- 27 Xu HC (徐化成). On the decrease of soil fertility in plantations. *World For Res* (世界林业研究), 1992, **5** (1): 66~73
- 28 Ma XQ (马祥庆), Liu AQ (刘爱琴), He ZY (何智英), Yu L (俞立), Lin JL (林景露). Effects of site preparations on ecosystem of Chinese fir plantations. *J Mount Sci* (山地学报), 2000, **18** (3): 237~243
- 29 Pan KW (潘开文), Liu ZG (刘照光), Chen QH (陈庆恒). Comparative study on the microclimate and water between preservation and silviculture belts. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 1998, **4** (3): 298~304