

文章编号: 1000-5692(2001)01-0041-05

元谋干热河谷人工林水分平衡分析及稳定性预测

马焕成¹, 吴延熊², 陈德强¹, Jack A. McConchie³

(1. 西南林学院 生态工程研究所, 云南 昆明 650224 2. 云南省林业科学院 云南省森林培育与开发重点实验室, 云南 昆明 650206; 3. Institute of Geography, School of Earth Sciences, Victoria University of Wellington, Wellington, New Zealand)

摘要: 根据旱季试验地土壤的自然含水量和植物的凋萎系数, 可以计算出旱季土壤所能提供的有效水分总量, 再利用各树种的单株水分消耗量, 即可估测出土壤对各树种的最大承载力。参照土壤的最大承载力, 云南元谋干热河谷的马占相思、大叶相思和绢毛相思的林分的定植密度以 5 000 株·hm⁻² (1.0 m×2.0 m) 为宜, 而厚荚相思、肯氏相思、赤桉、窿缘桉和柠檬桉5个树种的定植密度要低于 2 000 株·hm⁻²。大于这个密度, 就会造成旱季土壤供水不足。从树木个体发育的角度来看, 会促使植株衰老甚至死亡; 从林分角度来看, 容易导致林分的自然稀疏, 从而无法形成稳定的人工林。另外, 根据研究的结果, 从人工林的长期稳定性和改善林地小环境这两方面来考虑, 造林初期为了迅速覆盖林地, 尽早地形成森林环境, 仍需要适当密植。但随着林木的生长, 对水分的消耗增大, 为保持林分的相对稳定, 保证林木的存活与生长并逐步提高林地的生产力, 建议对四五年以上的林分进行适当修枝疏伐, 人为调节其密度, 预防林木大范围的死亡而导致人工林的衰退。表 6 参 10

关键词: 干热河谷; 水量平衡; 人工林; 桉树属; 相思树属
中图分类号: S715.5 **文献标识码:** A

干热河谷是横断山脉由于深切河谷所形成的特殊气候和地理类型。它的气候特点可以用 2 个字来概况, 即“干”和“热”。就“干”而言, 并不是绝对的降水量低, 以元谋干热河谷为例, 其年降水量平均为 600 mm, 相当于华北半湿润地区的降水量, 但由于其蒸发量达到降水量的 6 倍, 从而造成土壤的干旱。在最干旱的 5 月份, 干旱土层达到 1 m^[1,2]。干热河谷的“热”是指常年热量充足, 年平均气温达到 20℃以上; 植被表现出许多的热带成分。正是由于该地区的特殊气候条件, 植被恢复十分困难。有些在初期被规划为长江防护林体系建设工程的项目县, 由于造林的成活率和保存率达不到国家标准而被取消了项目县的资格^[3]。这其中的原因除了主观努力不够外, 在干热河谷造林困难是一个重要因素。

从目前的情况看, 限制干热河谷植被恢复的主要自然因素是水分。一旦水分问题解决, 植树造林是没有问题的, 而且, 由于其热量充足, 树木在干热河谷的生长速率与热带地区相当。正是基于这种思考, 我们将从土壤—植物—大气之间的水分关系来预测该地区人工林的稳定性。

1 材料和方法

试验选择在典型的干热河谷地区——元谋县苴林乡的试验林中进行。试验地海拔约 1 200 m, 坡

收稿日期: 2000-09-24; 修回日期: 2000-11-28
基金项目: 云南省中青年学术和技术带头人培养基金资助项目(98C060M); 云南省基础研究基金资助项目(98C012G)
作者简介: 马焕成(1962—), 男, 湖南武冈人, 副教授, 博士, 从事森林培育和生态工程研究。

度平缓, 土层厚度超过 1 m, 石砾含量少, 土壤为燥红土。当地植被为稀树草坡。

该地区气候属于南亚热带季风河谷干热气候, 光热充沛, 旱湿分明, 干热少雨是该区总的气候特点。年平均气温 21.9℃, 最热月均温 27.1℃, 极端高温 42.0℃, 最冷月均温 14.9℃, 全年日均温 ≥10℃的积温 8 003℃; 年日照时数 2 200~2 760 h, 日照率为 60%左右; 年降雨量 613.9 mm, 其中 6 至 10 月份降雨占总数的 92%, 旱季长达 7~8 个月。年蒸发量 3 847.8 mm, 年均空气相对湿度 53%, 年干燥度 2.08^[4]。

供试树种为 3 年生马占相思 (*Acacia mangium*)、大叶相思 (*A. auriformis*)、厚荚相思 (*A. aulacocarpa*)、绢毛相思 (*A. holosericea*)、肯氏相思 (*A. cunninghamii*)、赤桉 (*Eucalyptus camaldulensis*)、窿缘桉 (*E. exserta*) 和柠檬桉 (*E. citriodora*)。

叶片蒸腾速率采用 Li-1600 稳态气孔计测定^[5]。于自然状态下在同一小区各个树种中选定 1 株作为样株, 每株选取中部朝阳生长良好的老、幼叶各 2~3 片测定蒸腾速率。测定时间从 8:00 至 18:00, 每隔 2 h 测定 1 次, 全天共 6 次。

叶面积的测定是在试验林内选取各树种长势优中差 3 种水平的样树各 1 株, 先数其总叶片数, 再按适当比例选取有代表性的样叶描绘在透明硫酸纸上, 用求积仪测其面积。计算公式如下:

$$\text{样树叶面积} = \frac{\sum \text{单片样树叶面积}}{\text{样叶数}} \times \text{叶片总数}.$$
$$\text{各树种单株叶面积} = \frac{\sum \text{样树叶面积}}{\text{该树样树数}}.$$

根系调查: 选择生长良好的植株 (马占相思、大叶相思、厚荚相思、绢毛相思、肯氏相思、赤桉、窿缘桉和柠檬桉) 各 2 株, 沿主干向下挖土。挖掘面为半圆形, 包括上坡和下坡, 一直挖到能完整观察到根系的水平分布和垂直分布为止。用钢卷尺测量主根和侧根的水平伸展长度和垂直延伸长度, 并记录主根和侧根的数量。

土壤含水量: 将试验林地土壤划分为 4 个层次: 0~25 cm, 25~50 cm, 50~75 cm, 75~100 cm。在旱季 (2 月) 和雨季 (7 月) 用铝盒和环刀分别对各土层采样, 用烘干法^[6] 计算各土层容重和土壤自然含水量, 并测定毛管水含量和饱和水含量。

土壤质地: 从试验林地采回土壤样品 (7 月), 用比重计法^[6] 测定各个粒级颗粒的含量, 再根据我国土壤质地分类表 (1978 年), 查出各土层的质地。

2 结果和讨论

2.1 土壤含水量

从测定结果 (表 1) 来看, 旱季和雨季的自然含水量分别随土层深度的增加而逐渐增大, 这可能是因为试验林地的土壤属于表蚀燥红壤。由于水分蒸发强度较大, 表层土含水量较低, 而随着土层的加深, 蒸发减弱, 含水量增大。

表 1 元谋造林地土壤水分含量

Table 1 The soil moisture content of plantation in Yunan County

土层 深度/cm	各土层容重/ (g·cm ⁻³)	土壤自然含水量/%		土壤毛管水 含量/%	土壤饱和水 含量/%
		旱季	雨季		
0~25	1.34	8.32	16.2	48.57	60.60
26~50	1.47	9.81	19.2	44.22	52.12
51~75	1.51	9.86	21.8	40.27	47.88
76~100	1.42	10.74	24.5	39.36	47.67

2.2 土壤质地

从土壤质地 (表 2) 来看, 从表层到深层, 各土层质地依次为壤粘土、粉粘土、砂粘土和砂粘土。粘粒含量从上到下依次减少, 保水能力依次减弱, 这和土壤毛管水含量和饱和水含量从上到下依次递减的测定结果是一致的。

2.3 根系分布

从根系调查结果 (表 3) 可以看出, 8 个树种中, 赤桉和柠檬桉属于典型的深根型的树种, 窿缘

表 2 元谋造林地土壤质地（颗粒组成）分析

Table 2 The soil texture of plantation in Younamou County

土层 深度/cm	粗砂 (>0.25 mm)	细砂 (0.25~0.05 mm)	粗粉粒 (0.01~0.005 mm)	细粉粒 (0.01~0.05mm)	粗粘粒 (0.005~0.001 mm)	粘粒 (<0.001 mm)	质地
0~25	12.65	35.02	4.02	4.03	8.05	36.23	壤粘土
26~50	11.35	36.36	4.02	8.04	8.05	32.18	粉粘土
51~75	20.81	30.90	4.02	4.03	8.05	32.19	砂粘土
76~100	16.13	35.60	4.02	4.02	8.05	32.18	砂粘土

按则属于典型的水平型根系，马占相思、大叶相思、厚荚相思和肯氏相思等在垂直和水平方向的发育比较均衡，绢毛相思根系无论是深度还是宽度均不发达。发达的根系有利于植物在干旱条件下从土壤中吸收尽可能多的水分，以供本身和植物地上部分的需要，这是保证植物体内水分收支平衡的主要条件之一。从生长情况来看，赤桉和柠檬桉的树高、冠幅和地径等指标都比相思树种明显高出许多，表现出生长量大的特点。这与其根系的垂直分布有一定的关系。

2.4 蒸腾速率日进程

通过测定，可以看出 8 个树种蒸腾速率日进程的趋势有相似之处（表 4）。这 8 个树种蒸腾速率的最大值均出现在中午 12:00（绢毛相思出现在 14:00）。在 10:00~12:00，蒸腾速率总的呈上升趋势，而达到一天中的最大值后，蒸腾速率开始急剧下降，一直持续到 16:00~18:00。

表 3 各树种根系调查结果

Table 3 The root structure of tree species

树 种	树高/cm	主根深度/cm	侧根宽度/cm
马占相思	122	70.5	103.0
大叶相思	177	66.0	75.5
厚荚相思	184	53.5	61.0
肯氏相思	166	66.0	65.5
绢毛相思	145	36.5	48.5
赤 桉	253	118.5	124.0
窿 缘 桉	245	35.0	151.0
柠 檬 桉	304	84.0	106.0

表 4 各树种叶片蒸腾速率日进程

Table 4 The diurnal pattern of transpiration of the tree species

树种	蒸腾速率/ (g·cm ⁻² ·s ⁻¹)						平均值
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	
马占相思	0.468	0.555	1.219	0.430	0.210	0.113	0.499
大叶相思	0.396	0.464	1.169	0.522	0.132	0.171	0.476
厚荚相思	0.633	0.337	0.711	0.445	0.120	0.158	0.401
肯氏相思	0.491	1.125	1.275	0.998	0.260	0.190	0.723
绢毛相思	0.943	0.318	0.693	1.047	0.673	0.163	0.640
赤 桉	1.273	0.800	1.719	1.115	0.767	0.133	0.968
窿 缘 桉	1.833	1.450	2.743	0.805	0.173	0.173	1.196
柠 檬 桉	1.248	0.577	1.598	1.185	0.443	0.310	0.894

2.5 蒸腾引起的水分消耗量估测

水分消耗量受环境条件的影响，处于不断的变化过程中。为了便于计算，我们分时间段来分析水分消耗量的变化情况。计算方法是利用各时间段内叶片蒸腾速率与时间和叶面积的乘积。全天水分消耗量是将各时间段水分消耗量累计。蒸腾时间以 8:00 至 18:00 计算。

计算得 8 个树种的叶面积分别为：马占相思 5 830.36 cm²，大叶相思 4 227.32 cm²，厚荚相思 16 007.45 cm²，肯氏相思 14 093.87 cm²，绢毛相思 6 745.36 cm²，赤桉 10 163.68 cm²，窿缘桉 12 667.61 cm²，柠檬桉 10 492.99 cm²。各树种的水分消耗量见表 4 和表 5。从水分消耗量日变化情况可以看出：马占相思、肯氏相思、赤桉和窿缘桉 4 个树种在 1 d 中的水分消耗量在 10:00 至 12:00 达到最大，大叶相思、厚荚相思、绢毛相思、柠檬桉则在 12:00 至 14:00 达到最大。小分消耗量的最小值

均出现在 16:00 至 18:00。这是因为各个树种的蒸腾速率在 12:00（绢毛相思为 14:00）达到最大值，而 16:00 至 18:00 则是全天中蒸腾速率最小的时候。

8 个树种的全天水分消耗量大小依次为窿缘桉> 肯氏相思> 柠檬桉> 赤桉> 厚荚相思> 绢毛相思> 马占相思> 大叶相思。这与蒸腾速率大小排序有些不同，主要是因为各个树种的叶面积不同所致。肯氏相思和厚荚相思由于叶面积较大，因而尽管蒸腾速率的排序较后，但水分消耗量的排序却提前了几位。根据它们的水分消耗量，可以将它们划分为相对耗水型树种和节水型树种。窿缘桉、肯氏相思、柠檬桉和赤桉水分消耗量较大，为耗水型树种。厚荚相思、绢毛相思、马占相思和大叶相思为节水型树种。耗水型树种中水分消耗量最小的赤桉（336.9 g），比节水型树种中水分消耗量最大的厚荚相思（231.1 g）要大 45%，而窿缘桉的水分消耗量则是大叶相思的 7.2 倍。

2.6 人工林水分平衡分析及稳定性预测

土壤的自然含水量扣除植物的凋萎系数以后，才是可供植物利用的有效水分。根据土壤供给的有效水分总量和各树种的单株水分消耗量，可估测出土壤对各树种的最大承载力。计算公式为：

最大承载力 =
$$\frac{\text{土壤的有效水分总量}}{\text{树木单株水分消耗量}}$$

旱季元谋干热河谷各土层的自然含水量采用表 1 的数据。据中国科学院成都山地灾害研究所钟详浩测定，

元谋表蚀燥红壤的凋萎系数为 9.0%。由表 1 可知，试验林地土壤表土层（0~25 cm）的自然含水量（8.32%）小于凋萎系数，没有可供植物利用的水分。根据大部分根系的垂直分布（表 3），能够提供有效水分的土层厚度假设为 25~100 cm。根据这个土层厚度，可计算出每公顷土壤可供植物利用的有效水分总量为 1.24×10^5 kg，再根据各树种在整个旱季的单株水分消耗量（旱季为 11 月至翌年 5 月，计 210 d），即可估测出每公顷林地对各树种的最大承载力。估算结果如表 6 示。

需要说明的是这个最大承载力没有考虑土壤蒸发对土壤水分的影响，因为在旱季表层土壤完全干燥以后，土壤的毛细管运动几乎停止。因此，蒸发对下层土壤中的水分消耗的影响比植株蒸腾消耗的要小得多。此外，元谋地区土壤一般在 1 m 左右，下部为基岩，故对土壤水分的补充可以忽略不计。

表 6 土壤对各树种的最大承载力

Table 6 The maximum loading capacity of the land

项 目	马占相思	大叶相思	厚荚相思	肯氏相思	绢毛相思	赤桉	窿缘桉	柠檬桉
单株水分消耗量/kg	23.457	16.428	48.537	85.028	33.493	70.751	118.251	72.696
最大承载力/（株·hm ⁻² ）	5.286	7.548	2.555	1.458	5.278	1.753	1.049	1.700

从元谋干热河谷的实际情况看，制约森林形成的主要因素是水分。旱季的土壤水分状况和树木的耐旱性是决定树木能否生存的 2 个因素。本文所研究的 8 个树种，经前人研究表明^{7,8}和造林实践证明都表现出一定程度的抗旱性。因而这些树种能否形成稳定的人工林主要取决于土壤的水分状况即土壤的承载力。从水分供应的角度看，最大承载力是每公顷林地对各树种所能够承载的最大理论株数。在实际生产中，还要考虑到其他的立地条件，如土壤肥力、坡位和坡向等。元谋干热河谷地区的土壤

瘠薄，有机质含量低，因此实际承载力可能还要小一些。

我们认为如果要保持马占相思、大叶相思和绢毛相思人工林的稳定性，在该地区的定植密度应以 5 000 株[°]hm⁻² (1.0 m×2.0 m) 为宜，而厚荚相思、肯氏相思、赤桉、窿缘桉、柠檬桉等 5 个树种由于耗水量较大，其造林密度应低于 2 000 株[°]hm⁻²。大于这个造林密度，就会造成旱季土壤供水不足。当然，为了提早郁闭，尽早发挥林分的防护效果，造林的初植密度可以大于本文的预测密度值^[9]。

从树木个体发育角度看，当树木地上部分达到一定的生物量，总叶面积的耗水量超过土层的供水能力时，会促使植株生长停止。虽然在以后的雨季里有比较充足的水分供应，也不再能恢复其旺盛的生长，从而形成“小老头树”，甚至死亡。这种现象在我国干旱地区相当普遍^[10]。从林分角度来看，同一树种随着森林生物量的增加，树木对水分的消耗加大，有可能因为对水分的竞争加剧而导致林分的自然稀疏，从而无法形成稳定的人工林。

致谢：野外光合测定系统由云南省森林培育与开发重点实验室提供。特此致谢。

参考文献：

[1] 陈德强. 元谋干热河谷几种外来树种人工林旱季的水分动态研究[D]. 昆明：西南林学院，2000.
[2] 张荣祖. 青藏高原横断山区科学考察丛书——横断山区干旱河谷[M]. 北京：科学出版社，1992.
[3] 马焕成. 干旱和干热河谷的造林技术[A]. 国家林业局科学技术司. 长江上游天然林保护及植被恢复技术[C]. 北京：中国林业出版社，2000. 124—142.
[4] 云南省气象局. 云南农业气候资料集[Z]. 昆明：云南人民出版社，1984.
[5] Ma H C, Lindsay F. Photosynthetic response of *Populus euphratica* to salt stress. *For Ecol and Manage*, 1997, **93**: 55—61.
[6] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海：上海科学技术出版社，1978. 254—340.
[7] 张尚云，高洁，余丽云，等. 金沙江干热河谷植被恢复与造林技术研究[J]. 西南林学院学报，1997, **17** (2): 1—68.
[8] 李昆. 元谋干热河谷地区主要造林树种的抗旱特性与造林问题研究[D]. 昆明：西南林学院，1998.
[9] 云南省林业科学院. 云南主要树种造林技术[M]. 昆明：云南人民出版社，1985. 340—347.
[10] 黄枢，沈国舫. 中国造林技术[M]. 北京：中国林业出版社，1993. 259—336.

Predicting the stability by water dynamics in plantation stand
in dry-hot valley of Yuanmou County

MA Huan-cheng¹, WU Yan-xiong², CHEN De-qiang¹, McCONCHIE Jack A.³

(1. Institute of Ecological Program, Southwest Forestry College, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Key Laboratory of Forest Cultivation and Development, Yunnan Academy of Forestry, Kunming 650206, Yunnan, China; 3. Institute of Geography, School of Earth Sciences, Victoria University of Wellington, Wellington, New Zealand)

Abstract: The maximum loading capacity of soil can be estimated according to the water holding capacity of soil and the water consumption of trees during the drought period. The results showed the proper planting density of *Acacia mangium*, *A. auriformis* and *A. holosericea* was 5 000 trees per hectare (spacing of 2.0 m×1.0 m) and that of *A. aulacocarpa*, *A. cunninghamii*, *Eucalyptus camaldulensis*, *E. exserta*, *E. citriodora* should be less than 2 000 trees per hectare. If planted over the proper density, the trees would decline and even die for the insufficient supply of water. The data did not against that the trees should be planted in high density in the beginning for increasing the vegetation coverage. However, the intermedium thinning, pruning and other practices should be taken in order to prevent forest degradation due to over loading of water.

Key words: dry-hot valley; water balance; planted forests; *Eucalyptus*; *Acacia*