

文章编号: 1001-1498(2006)04-0467-05

元谋干热河谷人工林的土壤养分效应及其评价

马姜明^{1,2}, 李昆^{1,3*}

- (1. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 云南 昆明 650224;
2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091;
3. 国家林业局元谋荒漠生态系统定位研究站, 云南 昆明 650224)

摘要:研究了元谋干热河谷地区人工林对土壤养分的效应,并选择了土壤有机质、全N、速效N、速效P、速效K作为人工林重建对土壤养分效应的指标,运用灰色关联度进行综合评价。结果表明:(1)12年生的桉树、苏门答腊金合欢、新银合欢类人工林土壤表层有机质、全N量其增幅高于10年生、6年生的人工林;除念珠相思林以外,人工林表层土壤有机质含量均高于所在试验点的对照地。混交林对增加土壤表层有机质含量的作用非常明显,其改良能力优于纯林;人工林土壤表层全N含量均低于 $1.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;(2)速效N的变化规律与全N含量基本一致,速效P含量波动较大,土壤速效K含量比较丰富,pH值的范围在4.44~6.42之间;(3)灰色关联度分析的结果为赤桉+苏门答腊金合欢混交林对土壤养分的影响相对较大,其关联系数为0.651,影响最小的为念珠相思纯林,关联度系数为0.343。

关键词:干热河谷;人工林;土壤养分;灰色关联度;元谋

中图分类号: S714 文献标识码: A

Effects of Plantation on Soil Nutrient and Evaluation in Yuanmou Dry-hot Valley

MA Jiangming^{1,2}, LI Kun^{1,3}

- (1. Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, Yunnan, China;
2. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
3. Yuanmou Desert Ecosystem Research Station, State Forestry Administration, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: This paper selected surface soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen, phosphorus and potassium contents to study the effects of plantation on soil nutrient in Yuanmou Dry-hot Valley, then evaluated with grey relational analysis. Results are as below: (1) Surface soil organic matter and total nitrogen contents of 12-year old of *Eucalyptus*, *Acacia glauca*, *Leucaena leucacephala* increased much more than that of other 10-year old and 6-year old plantations. Surface soil organic matter contents of each plantation was higher than that of the control plot. Mixed forests could increase surface soil organic matter contents much more than that of pure forests. Surface soil organic matter contents of all plantations was under 0.1%. (2) The variation of available nitrogen was accordant with total nitrogen content. Available phosphorus content fluctuated much, available potassium content was abundant, pH value ranged from 4.44~6.42. (3) Through grey relational analysis, the *E. camaldulensis* + *A. glauca* mixed forest had the most effect on the soil nutrient most with the association coefficient of 0.651. The *A. tonulosa* pure forest got the least with the association coefficient of 0.343.

Key words: dry-hot valley; plantation; soil nutrient; grey relational analysis; Yuanmou

收稿日期: 2005-11-10

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(2001BA606A-07)及科技部公益性研究项目(2000DB50164)的部分研究内容

作者简介: 马姜明(1976—),男,江西永新人,博士生。

*通讯作者

具有热带“飞地”、“天然温室”之称的元谋地处云南北部,位于金沙江畔,具有典型的干热河谷气候。该地区水土流失严重、土壤沙化、有机质含量降低,土壤板结严重,大片的“光板地”随处可见。因此,加强该地区的土壤管理研究显得尤其重要。近年来,随着“长防”、“长治”等防护林建设工程,“退耕还林还草”和“生态环境重建”等工程的实施,该地区在适宜造林树种选择、造林技术措施、树种抗旱性机理、人工林地水分输入与土壤水分动态等方面做了大量的研究工作。通过引进的合欢、相思等豆科植物以及桉树进行该地区的人工林植被重建工作,取得了初步的成效。目前,有关该地区人工林重建对土壤养分效应的研究还较少见,因此,探讨不同人工林的土壤养分效应及其评价可对现有的人工林进行生态系统管理提供科学依据。

1 试验地概况

元谋县位于云南省滇中高原北部,金沙江中游一级支流龙川江下游。地理坐标为 25°25'~26°07' N, 101°35'~102°15' E;该区气候炎热,干湿季分明,年平均气温为 21.9℃,最冷月(12月)月均温为 14.9℃,最热月(5月)月均温为 27.1℃,年平均降水量为 630.7 mm,雨季(5—10月)降水量占年降水量的 90%以上;年均蒸发量为 3 426.3 mm,为年均降水量的 5.4倍;年均相对湿度为 55.8%,年均日照时数为 2 630.4 h,无霜期为 350~365 d。其气候与热带稀树草原(Savanna)气候相似。植被以扭黄茅(*Heteropogon contortus* (L.) Beauv.)为主,杂以灌木

坡柳(*Dodonaea viscosa* Jacq.)的稀树灌草丛^[1]。在小横山、岭庄、磨河、苴林等 4 个试验点选择立地条件一致的地段,按不同的树种组成人工林建立样地,进行群落学调查,各样地的基本情况见表 1。在各试验点与人工林相邻的地段选择荒地作为对照样地。

2 研究方法

2.1 土壤取样及分析

于 2003 年 5 月,在已建立的每种人工林类型标准地的 4 个角和中心点挖取土壤表层样品,深度为 0~25 cm,将 5 次重复的土样去除植物根系和石块,充分混匀混合并用四分法取大约 500 g 土样带回实验室进行分析。每种类型人工林重复取土样 3 次,共取样品 42 份。分析项目为土壤有机质、全 N、速效 N、速效 P、速效 K、土壤 pH 值。具体分析方法是:土壤有机质采用 $K_2Cr_2O_7$ 法;全 N 采用酸溶开氏法;速效 N 采用扩散皿法;速效 P 采用 Olsen 法;速效 K 采用原子吸收法;土壤 pH 值采用电位法测定。

2.2 土壤养分综合评价^[2-4]

灰色关联度分析是灰色系统理论中因子分析及关系分析的主要方法。可以分析因子间的影响程度或评价各因子对主行为的贡献程度。能对多个因子与土壤养分状况间的关系进行综合评价。具体方法为先对原始数据进行标准化处理,使标准化后的数值在 0~1 之间。选择各因子达理想状态时的数值为参考点,组成参考数列,即 $x_0 = [1, 1, \dots, 1]$,运用

表 1 不同人工林基本情况

样地号	树种组成	地点	海拔 /m	坡度 / (°)	坡向	坡位	年龄 /a
1	赤桉 + 新银合欢 <i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehu. + <i>Leucaena leucacephala</i> (Lam.) Dewit	小横山	1 110	3	SE	下坡	12
2	赤桉 + 苏门答腊金合欢 <i>E. camaldulensis</i> Dehu. + <i>Acacia glauca</i> (L.) Moench	小横山	1 160	3	S	中上坡	12
3	柠檬桉 + 新银合欢 <i>E. citriodora</i> Hook + <i>L. leucacephala</i> (Lam.) Dewit	小横山	1 110	0	SE	下坡	12
4	新银合欢 <i>L. leucacephala</i> (Lam.) Dewit	小横山	1 245	0	SW	上坡	12
5	柠檬桉 <i>E. citriodora</i> Hook	小横山	1 140	6	S	中下坡	12
6	赤桉 <i>E. camaldulensis</i> Dehu.	小横山	1 240	10	N	上坡	12
7	苏门答腊金合欢 <i>A. glauca</i> (L.) Moench	小横山	1 245	2	SW	上坡	12
8	印楝 <i>Azadirachta indica</i> A. Juss	磨河	1 080	10	SE	中坡	6
9	大叶相思 <i>A. auriculiformis</i> A. Cunn	岭庄	1 100	3	S	下坡	10
10	马占相思 <i>A. mangium</i> Willd	岭庄	1 100	2	S	下坡	10
11	纹荚相思 <i>A. plectocarpa</i> A. Cunn ex Benth	苴林	1 126	0	SE	下坡	6
12	台湾相思 <i>A. confusa</i> Merr	苴林	1 125	0	SE	下坡	6
13	绢毛相思 <i>A. holosericea</i> A. Conn ex G Don	苴林	1 125	0	SE	下坡	6
14	念珠相思 <i>A. toulosa</i> Benth	苴林	1 125	0	SE	下坡	6

公式 $d_{ij(p)} = |x_{ij} - x_{0j}|$, $i = 1, 2, \dots, n$; n 为各因子观察值个数; $p = 1, 2, \dots, m$; m 为因子数, 计算差值序列。然后求算 $d_{ij(p)}$ 的最小值 d_{\min} 和最大值 d_{\max} ; 根据公式 $L_{ij(p)} = (d_{\min} + 0.5 d_{\max}) / (d_{ij(p)} + 0.5 d_{\max})$ 计算关联系数序列, 根据 $R_{ij} = L_{ij(p)} / m$ 计算关联度。关联度越大说明因子间的变化态势越与理想状态接近, 其相互关系越密切。具体在本研究中, 评价土壤养分效应的关联度越大, 说明土壤肥力状况越好。本研究选择林地表层土壤全 N、速效 N、速效 P、速效 K、土壤有机质作为综合评价人工林土壤养分效应的指标。

3 结果分析

3.1 人工林对土壤有机质的影响

土壤有机质是林木生长营养的重要来源, 影响着一系列的土壤物理、化学和生物性质^[5]。它在改善土壤的物理性质、提高土壤的保肥能力以及缓冲性等方面具有重要的意义^[6,7]。对土壤有机质含量, 有两种不同的结论, 如王洪君等^[8]在研究落叶松人工林时发现落叶松人工林地土壤有机质含量明显低于对照地。而周厚诚等^[7]研究认为植被恢复过程中土壤有机质含量有明显的提高^[7]。根据 Chiarucci 等^[9]的研究, 认为在贫瘠退化的生态系统里引种外来植物会使土壤的有机质增加。

表 2 不同人工林表层土壤养分含量

样地号	全 N/ (g · kg ⁻¹)	速效 N/ (mg · kg ⁻¹)	速效 P/ (mg · kg ⁻¹)	速效 K/ (mg · kg ⁻¹)	有机质 / (g · kg ⁻¹)	pH 值
1	0.76	37.43	0.84	63.07	10.26	5.66
2	0.81	43.87	0.71	59.35	10.43	5.97
3	0.71	28.63	1.20	37.00	10.24	6.16
4	0.56	71.38	0.47	140.08	10.13	4.44
5	0.71	37.15	0.37	77.95	5.4	6.40
6	0.77	42.54	0.86	63.66	10.14	5.47
7	0.77	42.13	0.94	49.27	10.14	5.31
8	0.59	29.92	1.04	28.80	9.3	5.30
9	0.62	35.53	0.70	38.60	8.6	5.12
10	0.81	57.32	1.00	41.64	10.44	5.80
11	0.63	30.89	1.09	33.44	9.0	5.66
12	0.66	20.23	0.37	40.28	7.2	6.20
13	0.65	31.16	0.79	35.40	9.1	6.42
14	0.45	12.85	0.75	19.63	6.0	6.01
CK ₁	0.35	13.54	0.97	22.98	4.2	5.81
CK ₂	0.49	25.83	0.94	47.60	5.7	6.48
CK ₃	0.45	49.76	0.63	61.42	7.2	6.02
CK ₄	0.56	28.55	0.83	36.0	6.8	6.16

注: CK₁: 小横山对照样地; CK₂: 岭庄对照样地; CK₃: 磨诃对照样地; CK₄: 直林对照样地。

从表 2 可以看出, 除了念珠相思林以外 (其土壤养分指标均比对照样地低), 其他人工林表层土壤有机质含量均比对照样地明显增高。12 年生的人工林表层土壤有机质含量平均为 $12.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比对照样地增加了 197.6%, 10 年生的相思林、6 年生的印楝林和相思林分别增加了 101.8%、29.2%、15.1%。按林分年龄及混交林类型来比较土壤表层有机质含量的增幅, 其排序为: 12 年生的混交林 (211.9%) > 12 年生的苏门答腊金合欢和新银合欢纯林 (170.2%) > 10 年生的相思纯林 (101.8%) > 12 年生的桉树纯林 (100%) > 6 年生的印楝纯林 (29.2%) > 6 年生的相思纯林 (15.1%)。可以看出, 混交林对增加土壤表层有机质含量的作用非常明显, 其改良能力好于纯林, 显示了混交林的优越性。可以看出, 元谋干热河谷通过引进桉树、相思、苏门答腊金合欢、新银合欢、印楝等外来树种进行生态重建, 对土壤改良起到重要的作用。这与广东南澳岛植被恢复过程中群落土壤有机质有明显增高的趋势相一致^[7]。

3.2 人工林对土壤全 N 的影响

从表 2 可以看出, 在元谋干热河谷地区植被恢复过程中人工林土壤全 N 量逐步增加。12 年生桉树、苏门答腊金合欢、新银合欢人工林土壤表层全 N 量平均为 $0.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与对照样地相比, 增幅为 108.6%, 增幅远远高于其它人工林; 10 年生相思林平均全 N 量为 $0.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增幅为 45.9%; 6 年生印楝林全 N 量为 $0.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增幅为 31.1%; 6 年生相思林平均全 N 量为 $0.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增幅为 6.7%。从我国其它各地的情况来看, 一般立地条件较差的荒山表土, 全 N 量多处于 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下, 而在森林覆盖下的土壤全 N 量则较高^[5]。元谋干热河谷地区虽然引进了许多固氮植物种, 其土壤表层全 N 含量还是低于 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 该地区土壤贫瘠的程度可想而知。据报道, 苏门答腊金合欢、新银合欢、大叶相思等相思类植物都具有根瘤菌, 能起到固氮改良土壤的作用^[10-13]。这些树种根瘤固氮酶活性因昼夜和季节而变化, 昼夜变化与固氮能源的供应有关, 受光照、温度影响较大, 夏秋高, 冬季和早春低, 根瘤固氮酶活性主要受温度、光照强度、降水量等因素的影响^[14-17]。有研究认为像马占相思这样的固氮植物其新结瘤在 4—5 月份形成^[17], 而元谋干热河谷那时正值高温、干旱的最严重时期, 所以对新根瘤的形成起了很大的抑制作用。因而使得该地

区的固氮植物没有充分发挥其固氮作用,这可能是导致该地区人工林 N 含量低的重要原因。

3.3 人工林对土壤速效 N、速效 P、速效 K 的影响

树种、生长速度、造林时间的长短、枯落物量及其营养元素含量的不同,都会影响土壤养分的回归和利用,使得不同的人工林土壤速效 N、速效 P、速效 K 含量不同^[18]。速效 N 是土壤全 N 中能被植物直接吸收利用的部分。从表 2 可看出,其变化规律与全 N 含量基本一致。土壤表层速效 N 含量最高的是新银合欢林,为 $71.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最低的是念珠相思林,为 $12.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤表层速效 N 含量总平均为 $37.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,对照样地为 $29.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从总体来看,人工林地土壤表层速效 N 含量有比对照样地增加的趋势。但念珠相思林、台湾相思林和印楝林表层土壤速效 N 含量明显低于对照样地。土壤中的速效 P 是成土母质和一部分有机质矿化的产物。P 元素在生态系统中的循环速度不如 N 素强烈。不同人工林土壤表层速效 P 含量变化范围在 $0.37 \sim 1.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。赤桉纯林、柠檬桉纯林、新银合欢纯林、苏门答腊金合欢纯林速效 P 含量规律不明显。土壤速效 K 含量在很多土壤中其都比较丰富,植物从土壤中摄取的 K,除了 N 以外一般都比任何其他营养元素要多^[19]。从表 2 看出,林地表层土壤速效 K 含量最高为 $140.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最低为 $19.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效 K 含量平均为 $52.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这可能是由于相对干燥的土壤不易发生淋溶,从而导致速效态 K 聚积的缘故。从表中还可看出,不同人工林类型土壤各层速效 K 含量均高于土壤各层速效 N 含量。据中科院成都山地所分析,发现该地区燥红壤的干热变性土(膨胀土)中 K 含量每 100 g 土高达 50 mg 以上。

3.4 人工林对土壤 pH 值的影响

试验地 pH 值的范围在 $4.44 \sim 6.42$ 之间,根据土壤酸度分级,属弱酸到中等程度的酸性土壤。酸性相对较强的新银合欢纯林,土壤 pH 值为 4.44 。酸性相对较弱的为绢毛相思纯林,土壤 pH 值为 6.42 。可以看出,林分年龄越大,土壤 pH 值有降低趋势。一方面可能是由于土壤上层枯落物的增加为土壤真菌活动提供了丰富的资源,在酸性条件下,随土壤温度的增高真菌的活动进一步增强,加速了枯落物的分解,导致更多有机酸的释放,相继盐基又从矿质土壤表层淋失,致使其土壤酸度增强;另一方面,这可能与树种分泌的诸如酚类等化学物质有关。

3.5 人工林对土壤养分效应的综合评价

运用灰色关联度评价了不同人工林的土壤养分效应,1~14号样地的关联系数见表 3。从评价的结果可以看出,赤桉苏门答腊金合欢混交林的关联系数为 0.651 ,在所研究的林分类型中关联度最大,说明该类型林分改善土壤的效果最明显,土壤综合肥力最高。苏门答腊金合欢、新银合欢两树种也表现出较好的改良土壤能力。10 年生的相思林均比 6 年生的相思林的土壤肥力状况略好,念珠相思纯林的关联度系数最小,为 0.343 。从前面的分析可知土壤肥力比对照样地还低,表现出地力衰退现象。同时,从评价结果也看出,造林时间的长短对土壤改良效果的影响也较明显。

表 3 不同类型人工林土壤养分关联系数

样地号	全 N	速效 N	速效 P	速效 K	有机质	关联度
1	0.959	0.490	0.377	0.454	0.760	0.608
2	0.909	0.543	0.363	0.441	1.000	0.651
3	0.412	0.370	0.402	0.336	0.416	0.387
4	0.538	1.000	0.342	1.000	0.374	0.651
5	0.805	0.488	0.333	0.506	0.646	0.556
6	1.000	0.531	0.379	0.455	0.640	0.601
7	1.000	0.527	0.387	0.413	0.646	0.595
8	0.805	0.433	0.418	0.382	0.862	0.580
9	0.374	0.369	0.464	0.339	0.474	0.404
10	0.429	0.383	0.365	0.345	0.400	0.384
11	0.396	0.365	0.426	0.349	0.377	0.383
12	0.407	0.346	0.339	0.358	0.349	0.360
13	0.402	0.366	0.385	0.352	0.353	0.372
14	0.333	0.333	0.380	0.333	0.333	0.343

4 结论与讨论

(1) 12 年生的桉树、苏门答腊金合欢、新银合欢类人工林土壤表层有机质、全 N 量及其增幅高于 10 年生的相思林,6 年生的相思林和印楝林。除念珠相思林以外,人工林表层土壤有机质含量均高于所在试验点的对照样地。混交林对增加土壤表层有机质含量的作用非常明显,其改良能力优于纯林。元谋干热河谷通过引进桉树、相思、苏门答腊金合欢、新银合欢、印楝等外来树种进行生态重建,对土壤改良起到重要的作用。

(2) 速效 N 的变化规律与全 N 含量的变化规律基本一致,速效 P 含量波动较大,土壤速效 K 含量比较丰富,pH 值的范围在 $4.44 \sim 6.42$ 之间。

(3) 灰色关联度分析结果表明 12 年生的赤桉 +

苏门答腊金合欢混交林对土壤养分的影响相对较大,其关联系数为 0.651,影响最小的为 6 年生的念珠相思纯林,关联度系数为 0.343。排列顺序为:12 年生的赤桉 + 苏门答腊金合欢混交林 > 12 年生的新银合欢纯林 > 12 年生的赤桉 + 新银合欢混交林 > 12 年生的赤桉纯林 > 12 年生的苏门答腊金合欢纯林 > 12 年生的柠檬桉 + 新银合欢混交林 > 12 年生的柠檬桉纯林 > 6 年生的印楝纯林 > 10 年生的大叶相思纯林 > 10 年生的马占相思纯林 > 6 年生的纹荚相思纯林 > 6 年生的绢毛相思纯林 > 6 年生的台湾相思纯林 > 6 年生的念珠相思纯林。

(4)通过该研究可知,元谋干热河谷地区人工林地土壤养分极度贫乏,应通过整地和适当施肥,改善土壤的物理性状,可以增加土壤的通透性增强某些微生物的活性从而加快林地枯枝落叶的分解,进而改善土壤肥力,促进林木生长。另外,枯枝落叶确保留在林内,避免被当地群众收集,以保证人工林生态系统养分平衡和人工林生态系统物质循环和能量流动的畅通性,防止人工林地力衰退。

参考文献:

- [1] 李昆,曾觉民. 元谋干热河谷地区不同造林树种对土壤的改良作用研究[J]. 西南林学院学报, 1999, 19(3): 161~164
- [2] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1987
- [3] 张星耀. 森林病理学研究的生态数学方法[M]. 北京:中国林业出版社, 1999
- [4] 李跃林,李志辉,李志安,等. 桉树人工林地土壤肥力灰色关联分析[J]. 土壤与环境, 2001, 10(3): 198~200
- [5] 刘增文,李雅素. 生态系统稳定性研究的历史与现状[J]. 生态学杂志, 1997, 16(2): 58~61
- [6] 余作岳,彭少麟. 热带亚热带退化生态系统植被恢复生态学研究[M]. 广州:广东科技出版社, 1996
- [7] 周厚诚,任海,向言词,等. 南澳岛植被恢复过程中不同阶段土壤的变化[J]. 热带地理, 2001, 21(2): 104~112
- [8] 王洪君,宫芳,郑宝仁,等. 落叶松人工林的土壤理化性质[J]. 东北林业大学学报, 1997, 25(3): 75~79
- [9] Chiarucci A, De Dominicis V. Effects of pine plantations on ultramafic vegetation of central Italy [J]. Israel Journal of Plant Sciences, 1995, 43(1): 7~20
- [10] 方发之. 马占相思在海南的发展与展望[J]. 热带林业, 1997, 25(1): 9~11
- [11] 李芳,邓桂英. 从文献计量分析看我国马占相思的研究现状[J]. 广西林业科学, 2002, 31(4): 214~217
- [12] 李纪元. 金合欢属植物资源在我国亚热带的引种潜力[J]. 福建林学院学报, 2002, 22(3): 283~288
- [13] 庄馥萃,张雪珠. 苏门答腊金合欢适应性和利用的研究[J]. 植物引种驯化集刊, 1993(8): 77~87
- [14] 丁明懋,蚁伟民,兰玉,等. 生态条件对马占相思结瘤固氮的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 1994, 2(2): 15~21
- [15] 黄维南,蔡克强,邹小鲁. 大叶相思的结瘤固氮和吸氢酶活性[J]. 亚热带植物通讯, 1990(1): 1~6
- [16] 蔡克强,黄维南,邹小鲁. 台湾相思的结瘤固氮和吸氢酶活性研究[J]. 亚热带植物通讯, 1993, 22(1): 1~6
- [17] 黄维南. 树木的共生固氮及固氮放线菌[A]. 见:尤崇杓,宋鸿遇,姜涌明. 生物固氮[M]. 北京:科学出版社, 1987: 322~346
- [18] 何斌,温远光,袁霞,等. 广西英罗港不同红树植物群落土壤理化性质与酶活性的研究[J]. 林业科学, 2002, 38(2): 21~26
- [19] 张鼎华. 人工林地力的衰退与维护[M]. 北京:中国林业出版社, 2001