

传统农业生态系统中桤木改良土壤效应研究综述

李苏梅^{1 2} 龙春林^{1*} 刀志灵¹

(1 中国科学院昆明植物研究所, 昆明 650204) (2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 桤木 (*Alnus nepalensis*) 是一种重要的非豆科固氮植物, 广泛分布于喜马拉雅山脉东部地区。在东南亚地区的传统农业生态系统中, 多用桤木作为休耕树种, 或将其与农作物间作。桤木根瘤固氮量随季节和年龄而变化, 在桤木-小豆蔻 (*Elettaria cardamomum*) 系统中 15 年达到高峰 (155 kg·hm⁻²)。桤木通过共生固氮对系统产生的氮增加量在纯桤木林中 7 年达到高峰 (117 kg·hm⁻²)。桤木与农作物间作可显著提高农作物的产量, 桤木-小豆蔻立地上小豆蔻的经济产量是在森林-小豆蔻立地上的 2.2 倍。桤木休闲地的休闲效果明显好于自然休闲地, 其地上部分生物量在休闲 6 年后是自然休闲地的 4 倍, N 蓄积量是自然休闲地的 3 倍, P、K 蓄积量是自然休闲地的 2 倍。桤木根系特征似乎最适合混农林系统, 其细根生物量 (FRB) 集中于土壤剖面上层 10 cm 范围内, 在此范围内, FRB 在“树+农作物”间作条件下比在“只有树”条件下高 5%, 在两种立地条件下, 60% 以上的细根都分布于树干周围 0.5 m 内, 大部分木质根 (直径 > 0.5 mm) 都分布于土壤上层 0~10 cm 处, 长度都不超过 1 m。桤木可加速系统的养分循环。桤木凋落物降解速率比非固氮植物快, 并且与其它植物凋落物混合后的降解速率与自身凋落物降解速率一样快。在传统刀耕火种系统中, 用桤木替代自然林休闲在 3~6 年内即可恢复土壤肥力, 改善土壤理化性质, 显著缩短休闲周期。该文综述了近 30 年来桤木在传统农业生态系统中改良土壤效应的研究成果, 以提高人们对桤木的生态作用的重视程度, 使人们更好地将桤木利用到农业生态系统中, 达到发展山区农业和保护生态环境双赢的目的。

关键词 桤木 共生固氮 氮增加量 生物量 养分循环 农业生态系统 混农林业

AN EFFECTIVE WAY TO IMPROVE SOIL FERTILITY IN TRADITIONAL AGROFORESTRY: PLANTING *ALNUS NEPALENSIS*

LI Su-Mei^{1 2} LONG Chun-Lin^{1*} and DAO Zhi-Ling¹

(1 Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650204, China)

(2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Alder (*Alnus nepalensis*), an important non-legume nitrogen-fixing plant, occurs widely in the eastern Himalayas. In traditional agroecosystems of Asia, alder is commonly used as a fallow tree or is intercropped. There has been growing concern about ecological and economical values of alder, and this has resulted in greater interest in the utilization of this species. Soil-improvement functions of alder in traditional agroecosystems were reviewed based on research results for the last 30 years, in order to bring attention to alder's role in traditional agroecosystems, promote the development of agriculture in mountain areas and protect the environment.

Soil improvement functions of alder in traditional agroecosystems were as follows: 1) Seasonal nitrogen accretion in alder stands was high during the growing season between June and November (95% - 98% of total annual accretion) and very low from December to April (2% - 5%). Annual accretion of nitrogen was the highest (117 kg·hm⁻²) in a 7-year stand. Annual symbiotic nitrogen fixation in alder-cardamom (*Elettaria cardamomum*) plantations was the highest (155 kg·hm⁻²) in a 15-year stand and decreased with increasing plantation age. 2) Alder performed well with intercropping or as a fallow tree. When intercropped, it could improve the agronomic yield of crops. The agronomic yield of cardamom was 2.2 times greater under the canopy of alder than under natural forest. As a fallow tree after a 6-year fallow period, the above-ground biomass in alder fallows was 4 times greater than in grass fallows, N accumulation was 3 times greater than in grass fallows and P and K were both about double the level found in grass fallows. 3) Alder seemed to have the most desirable rooting characteristics for agroforestry systems. Most fine roots were concentrated in the upper 10 cm of the soil, but coarse roots were concentrated at 10 - 20 cm depth. The fine root biomass (FRB) in inter-

收稿日期: 2005-04-27 接受日期: 2006-02-13

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KSCX2-SW-117) 美国国家自然科学基金重点项目 (DEB-0103795) 和国家科技部自然科技资源基础条件平台项目 (2004DKA30430)

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: long@mail.kib.ac.cn

cropping was 5% greater than when grown as a fallow tree. Sixty percent of the fine roots were distributed 0.5 m from the tree trunk. Most of the woody roots (> 5 mm diameter) were present within 0–10 cm depth near the tree trunk in both intercropping and fallow-tree situations. Total root length of woody roots was < 1 m. 4) Nutrient cycling rates were higher in alder plantations than under other plantations. Rates of litter production and decomposition were 1.59 and 1.79 times higher, respectively, in alder-cardamom stands than in forest-cardamom stands. The litter from N₂-fixing species may accelerate the decomposition of other types of litter. When mingling with alder litter, other types of litter decomposed as rapidly as the alder litter. 5) In the traditional swidden agricultural system, fertility of the soil under alder fallow could be rejuvenated in 3–6 years, which reduced the fallow period remarkably, and physical and chemical properties of the soil could be improved greatly.

Although the functions of the alder for improving soil have been researched much, the problem of how to simultaneously achieve the best economical and ecological values of co-planting crops and the alder in mountain areas needs further study.

Key words Alder (*Alnus nepalensis*), Symbiotic nitrogen fixation, Nitrogen accretion, Biomass, Nutrient cycling, Agroecosystems, Agroforestry

桤木(*Alnus nepalensis*)又称旱冬瓜或水冬瓜,属桦木科桤木属植物,是喜马拉雅山脉东部地区的常见树种,生于亚热带到温带区域中新暴露的土壤、岩石和被侵蚀的缓坡上(Sharma & Ambasht, 1984)。它根部寄生固氮放线菌,能固定空气氮,而且固氮效率高,是一种重要的非豆科固氮植物(Bond, 1976)。

人类的参与是土地恢复的先决条件(Bartlett, 1992; Rao & Saxena, 1996; Maikhuri *et al.*, 1997),在任何可行的地方,发展多用途树木-农作物联合的混农林模式,配合适当的土壤和水分管理技术,是一种有效的发动当地群众参与的土地恢复途径(Maikhuri *et al.*, 2000)。桤木便是一种多用途树木,以桤木为基础的混农林系统可以保持水土、维持土壤肥力、防止土壤侵蚀和土地退化;此外,其嫩叶是良好的饲料,枝干可作薪柴,树皮可提炼栲胶,又可作药,木材可作家具及包装箱等(赵磊, 1991);桤木林还是天然的阻火林(刘爱荣等, 1996)。在印度东北部的那加兰邦(Cairns *et al.*, 1997; Dhyani, 1998)、缅甸北部(Troup, 1921; Cairns *et al.*, 1997)和尼泊尔(Tang, 1999),桤木长期以来都作为休耕树种种植于休闲地上。我国云南西部的怒江、保山、德宏和西南部的临沧、思茅等地的汉、佤、白、景颇、独龙、傈僳、怒等民族也普遍种植桤木,并与农作物轮作(郭辉军, 1993; Guo *et al.*, 1997; 龙春林等, 1999, 2004)。桤木与陆稻轮作是滇西地区最为古老,又较为合理的农耕制度之一。明洪武年间即有桤粮轮间作,历史愈 300 年,实际历史可能更长(郭辉军, 1993)。

云南各民族利用桤木进行刀耕火种的模式主要

有以下几种(尹绍亭, 2000): 1) 农作物-桤木-农作物:一般是抛荒第一年的 6~7 月种植桤木,经过 5~10 年或更长时间的休闲,全面清除桤木后开始新一轮的耕作。耕种 1~3 年,少数 4~5 年,再休耕种植桤木。2) 桤木-农作物 + 桤木-桤木:桤木休闲结束后,并不将桤木全部砍伐,而是在地周或地中留下少量植株,作为母树,起到遮荫作用,其落叶可作为绿肥。耕作期间保留地中萌发的桤木幼苗,2~3 年后,幼苗长高就再次丢荒。3) 农作物-农作物 + 桤木-桤木-农作物:耕作期间的最后 1~2 年里,在地里种上桤木幼苗,待桤木长得比较高了再抛荒。休闲若干年后,再次砍地烧地,开始新一轮的耕作。

本文将桤木在传统农业生态系统中的土壤生态作用作了综述,以便更好地将桤木利用在农业生产之中。

1 桤木的分布及其固氮特性

1.1 分布

桤木是典型的喜马拉雅植物区系成分,从巴基斯坦到尼泊尔、印度北部、不丹、缅甸、印度支那、日本、越南、柬埔寨和老挝均有分布,非洲许多国家有引种栽培(Neil, 1990; World Agroforestry Centre, 2005);在中国主要分布于云南、四川西南部、西藏东南部、贵州和广西西部;在云南分布很广,除南部低海拔地区外,几乎遍及全省各地,其中以滇西、滇中各地较为集中。桤木分布海拔范围为 1 000~3 000 m,但以 1 400~2 400 m 较普遍。桤木性喜温凉湿润,分布区平均温度 12~18℃,最热月平均温度

1) Fu H (付洪)(2003). Study on arlder-based shifting cultivation(桤木轮歇农业研究). Master dissertation of Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, 11. (in Chinese with English abstract)

16~22℃,最冷月平均温度4~12℃;活动积温3300~6000℃,年降雨量800~1500mm,相对湿度70%~76%(Sharma *et al.*, 1998)。林下土壤多为湿润肥厚的山地森林黄红壤及黄壤,其次有红壤及棕壤,母岩有砂岩、泥岩、花岗岩、板岩等。桫欏木林一般是在常绿阔叶林遭砍烧破坏后形成的一种次生类型,多分布在山坡中部、下部及背沟湿润地段,特别常见于常绿阔叶林林缘的撩荒地上(赵磊, 1991)。

1.2 固氮特性

桫欏木的共生固氮菌 *Frankia* 感染桫欏木的根部后,形成一个围绕中柱维管束的含菌组织,在受感染的寄主细胞内, *Frankia* 菌的菌丝从寄主细胞中央开始生长,菌丝生长的同时,受感染细胞的体积也随之增大,最后,菌丝顶端膨大,在靠近寄主细胞壁的区域形成泡囊从而成为成熟的固氮根瘤(赵之伟等, 1992)。

桫欏木根瘤皮层细胞中 *Frankia* 囊泡在雨季较多,同时固氮活性也较高,这表明 *Frankia* 囊泡是酶活性位点(Pradhan, 1993)。Schwintzer 等(1982)的研究也说明 *Frankia* 囊泡是固氮酶活性位点。在隆冬季节,桫欏木根瘤组织基部和中部的细胞容纳了大量 *Frankia* 孢子囊,表明冬季 *Frankia* 菌的生长和固氮活动都停止了。内生菌形成孢子并通过根瘤腐烂时散布开来,进一步巩固了土壤中 *Frankia* 菌的种群,从而克服了冬季不利的环境条件,而后在生长季节再侵染新的根(Akkermans & van Dijk, 1981)。

2 传统农业系统中桫欏木对土壤的综合改良作用

2.1 通过生物固氮增加生态系统的氮含量

桫欏木通过与 *Frankia* 菌共生结瘤从而固定空气中的氮元素是其对生态系统做出的最重要的贡献。Sharma 和 Ambasht (1988)用乙炔还原法和桫欏木的 $C_2H_2:N_2$ 转化因子(2.4:1),直接测定了一系列年龄桫欏木林的生物固氮量。季节固氮量在所有年龄立地上显示出两个不同的方面,在7~11月间的生长季节有较高的氮增加量(占全年氮增加量的95%~98%),而在12月~翌年4月的休眠季节,氮增加量很低(2%~5%)。除了7年生的桫欏木林,在其它所有立地上,氮增加量最高的月份是9~11月。7年生桫欏木林氮增加量最高的月份是6~8月。在4个较老的立地上(17、30、46、56年生),6~8月氮固定率较高,但氮增加量却较低,因为在随后的生长季节中,如10~11月,活性根瘤生物量更高(Sharma &

Ambasht, 1986)。年氮增加量在7年生立地上最高(117 $kg \cdot hm^{-2}$),而56年生立地最低(29 $kg \cdot hm^{-2}$)。但Sharma 等(2002)的结果表明年氮固定量从5年的立地(52 $kg \cdot hm^{-2}$)开始增加,在15年生立地上到达高峰(155 $kg \cdot hm^{-2}$),然后随立地年龄增长而降低。

7年生立地上的年总氮吸收量(来自土壤和氮固定)是56年生立地上的1.3倍。氮增加量随着立地年龄的增长急剧减少。在7、17、30、46和50年生的立地上,生物固氮量对全氮吸收量的贡献率分别为33%、19%、15%、13%、和11%,对氮的需求量也相应减少。尽管在17、30和46年生立地上的全氮吸收量相同,但通过生物固氮产生的氮增加量却随着立地的年龄增长而逐渐减少了,分别为56、45和37 $kg \cdot hm^{-2}$ (Sharma & Ambasht, 1988)。其原因可能有两点:一是立地早年通过生物固氮产生的氮增加量使得桫欏木后期不需要再固定更多的氮即可以满足其氮需求量;二是随着树龄增加,新陈代谢速率减慢,桫欏木对氮的需求逐渐减少,对共生固氮菌的养分供应速率也相应减慢,因而固氮量也相应减少。由此可看出,到一定年龄后,随着立地年龄的增长,桫欏木对系统的氮含量的贡献率逐渐减少。

2.2 增加混农林系统中的生物量

2.2.1 地上部分生物量

Sharma 等(1994)在锡金(Sikkim)研究了有桫欏木和没有桫欏木的基于小豆蔻(*Elettaria cardamomum*)的混农林系统中的生物量、净初级生产力和农作物产量。在桫欏木-小豆蔻混农林系统和森林-小豆蔻混农林系统中,树木的密度和基本面积分别是517株· hm^{-2} 和5.6 $m^2 \cdot hm^{-2}$ 、850株· hm^{-2} 和6.3 $m^2 \cdot hm^{-2}$ 。在两种混农林系统中,小豆蔻的种植密度相等,6年后桫欏木-小豆蔻立地上小豆蔻的栽培数量(96400· hm^{-2})和基本面积(22.5 $m^2 \cdot hm^{-2}$)是在森林-小豆蔻立地上的2.26倍;而其全生物量比森林-小豆蔻立地上的高28%。尽管桫欏木的立地密度稍低,但其生物量却略高于森林-小豆蔻立地上树木的生物量。在桫欏木-小豆蔻立地上和森林-小豆蔻立地上,小豆蔻对全生物量的贡献率分别为34%和18%。立地全生物量、树木数量及其基本面积、小豆蔻生物量在桫欏木的影响下都较高。桫欏木-小豆蔻立地上小豆蔻的经济产量是在森林-小豆蔻立地上的2.2倍(Sharma *et al.*, 1994)。Binkley 等(1992)也报道在美国低肥力地区,桫欏木属植物和针叶树混交立地的生物量比针叶树纯林立地的生物量高69%。年净初级生产力在28年的铁杉(Douglas-fir)和桫欏木属植物混种

的立地上比纯铁杉立地上高 2.5 倍。

付洪和陈爱国(2004)对桉木休闲地与自然休闲地进行比较研究发现,桉木休闲地的地上部分生物量和养分含量高于自然休闲地。休闲 6 年后,桉木林的地上部分生物量干重达到 $69\ 640\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,是

自然休闲地的 4 倍;桉木休闲地 N、P、K 3 大营养元素的地上部分蓄积量经过 2~3 年超过自然休闲地,休闲 6 年后 N 蓄积量达到 $557\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,是自然休闲地的 3 倍。P、K 的蓄积量分别达到 41 、 $265\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,是自然休闲地的 2 倍(表 1)。

表 1 桉木林和自然林养分蓄积量变化比较

Table 1 Comparison of alder fallows and grass fallows' nutrients accumulations

林龄 Age(a)	养分蓄积量 Nutrient accumulations($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)					
	桉木休闲地 Alder fallow stands			自然休闲地 Grass fallow stands		
	N	P	K	N	P	K
1	13.6	0.9	5.6	45.1	7.5	57.4
2	122.2	8.6	53.0	49.3	7.7	59.8
3	283.9	20.4	129.8	51.6	7.0	60.7
4	300.3	21.5	136.1	73.6	8.0	54.2
5	416.4	30.1	193.5	115.1	13.6	122.9
6	557.1	40.8	265.4	171.6	19.3	137.1

数据来源:付洪和陈爱国,2004 Source: Fu & Chen, 2004

以上研究表明桉木可在不同程度上增加系统生物量,桉木林下的植物要比其它林下的植物长势好。但是 Dhyani 和 Tripathi(1999)得到了一些不同的结果。他们研究了 7 年时期的混农林系统中树木生长、存活和作物产量。间作中桉木的生长势较好,并且生长量和生物量最高,可能是由于其自身能固定空气氮。但是在与桉木间作的地块,作物产量减少,而当作物与树木的距离加大,则产量有所增加。间作中所有树木的生物量都比单作树木生物量高,这可能得益于间作中对农作物进行的土壤中耕、除草以及施肥等因素。类似的结果在不同土壤和气候条件下也报道过(Yamoah *et al.*, 1986; Atta-Krah, 1990; Kass *et al.*, 1992; Singh *et al.*, 1997)。而与树木的间作中作物产量的减少,可能是由于冠层的遮荫效应和树木根系对养分和水分的竞争。Szott 等(1991)和 Salazar 等(1993)也认为,根对于水分和养分的竞争是导致混农林系统中树木与农作物间作时作物产量减少的主要原因。尽管如此,Dhyani 和 Tripathi(1999)发现来自树木的薪柴和木材足够填补农作物产量的减少,而且与单独种植树木的情况相比,“树木+农作物”的混合种植能获得更好的总产量效益。因此,总的来说,桉木与农作物间作利大于弊。

2.2.2 地下部分生物量

根的分布和密度主要由遗传决定,同时也受土壤类型、湿度、养分有效性、有机质分布和土壤管理的影响(Myers *et al.*, 1994)。Dhyani 和 Tripathi

(2000)对混农林系统中的桉木、柑橘(*Citrus reticulata*)、樱桃(*Prunus cerasoides*)和合欢树(*Paraserianthes falcataria*) 4 种植物的细根、粗根生物量和产量作了比较研究。随树种、农作物和季节的变化,细根生物量(FRB)有显著差异($p < 0.01$)。细根生物量和细根死亡量(FRN)的季节变化非常明显,秋季(温暖的雨季后的转化时期)最高,冬季最低。通常各种树的 FRB 和 FRN 值在“树+农作物”间作的条件下比在“只有树”的条件下高 3%~26%。粗根生物量(CRB)和粗根死亡量(CRN)的季节变化与细根一致,而在“树+农作物”间作的条件下与在“只有树”的条件下无显著变化。

细根生物量集中于土壤剖面上层 10 cm 范围内,密度随土壤深度增加而降低。在 10~20 cm 深的范围内,桉木细根生物量占 28%,20~30 cm 范围内 19%,80%以上的细根都集中于 0~20 cm 范围的土层中。7 年生桉木细根生物量比 6 年生桉木低 8%。在“树+农作物”间作和在“只有树”的条件下,细根的分布和季节变化都相似。在土层 0~10 cm 范围内,桉木的细根生物量在“树+农作物”间作条件下比在“只有树”条件下高 5%。在 10~20 cm 和 20~30 cm 范围内都有类似的结果。0~10 cm 范围内最大细根生物量出现于 10 月,最小量出现于 1 月。4 种树中,桉木的细根死亡量占细根量的百分率最高。桉木的细根生物量占总根量的 84%。在两种条件下,桉木的粗根生物量都是在 10~20 cm 范围内最高。在两种立地条件下,60%以上的桉木

细根都分布于树干周围 0.5 m 内, 36% 分布于 0.5 ~ 1 m 范围内。桉木的大部分木质根(直径 > 0.5 mm) 都分布于土壤上层 0 ~ 10 cm 处, 长度都不超过 1 m。Dhyani 和 Tripathi (2000) 认为桉木根的特性似乎最合适于混农林系统。

2.3 加速养分循环

养分循环是许多因素作用的结果, 如微气候、种类组成、立地年龄、生物对该系统的压力等等。养分循环率是植物生长状况的一个重要指标, 它可被用于评价系统的可持续性(Sharma *et al.*, 1998)。Sharma (1993) 对一系列年龄桉木林的养分循环作了研究。由于桉木具有较高的固氮率, 其不同组分的氮浓度都较高, 叶中为 3.5%, 凋落物中为 2.51% (Semwal *et al.*, 2003)。桉木中磷浓度范围是 0.08% ~ 0.10% (Sharma, 1993)。

土壤中的养分水平取决于系统的输入和输出量。在一系列年龄桉木林下土壤中, pH 值在 4.1 ~ 5.2 之间, 高地带比低地带具有较高的养分含量。土壤 30 cm 深处的全氮平均浓度较高(在 0.454% ~ 0.723% 之间), 并且随林地年龄的增加而升高。桉木林下土壤中有效磷和交换钾及钙的浓度相对较低(Sharma *et al.*, 1985)。Binkley (1983) 也报道在肥沃的红赤杨 (*Alnus rubra*) 的立地上土壤全氮含量增加, 而交换性阳离子却减少。土壤中交换性钾和钙的含量在 17 年生的立地上比 7 年生立地上高, 并且在成熟的林地中, 这个值基本不变(Sharma, 1993)。

Sharma (1993) 研究了不同年龄桉木林大量营养元素动态。大多数树木和林下叶层的成分中养分浓度顺序是 $N > K > Ca > P$, 永久部分的养分浓度与胸高直径成反比。成熟树不同部位养分含量的相对顺序是树干 > 树枝 > 地下部分 > 嫩枝和叶 > 柔荑花序。土壤全氮和有效磷随树林年龄增长而增加。每年通过凋落物向地表输入的养分 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 是 N 183 ~ 235, P 4.9 ~ 7.0, K 33.5 ~ 39.5, Ca 9.2 ~ 10.8。每年通过生物固氮增加的氮量在不同的树林中为 52 ~ 155 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不同养分在不同年龄的树林中的流通率和流通时间分别在 (0.10 ~ 0.55) a^{-1} 和 1.8 ~ 9.3 年之间。除了钙元素外, 其它元素的养分利用率随树林年龄的增长而降低。Sharma 等 (2002) 对一系列年龄的桉木-小豆蔻立地的研究结果显示, 桉木叶片养分浓度与立地年龄成负相关。氮和磷的吸收在 40 年立地上最低, 在 15 和 5 年立地上最高。在 15 年立地中, 小豆蔻的养分储量非常高, N 和 P 含量分别占所有立地 N 和 P 总含量的

31% 和 59%。氮蓄积量在 15 年立地上最高 (554 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 以后随立地年龄增长略有下降, 磷蓄积量有相同趋势, 15 年立地上最高 (48 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 以后也随立地年龄增长略有下降。氮在桉木和小豆蔻中的流通时间都是从 5 年立地的 1.83 年开始增加, 到 40 年立地达到高峰 (8.32 年)。磷在各年龄层的立地上流通时间都较低, 从 5 年立地的 1.1 年到 40 年立地的 1.83 年。两种营养元素的流通时间在小豆蔻中变化较小。然而桉木林中氮的流通时间在 15 年后显著增加, 磷则基本不变, 而其值在纯桉木立地中要比在桉木-小豆蔻林中略低, 这说明桉木与小豆蔻混作可延缓磷的流通。

研究表明养分利用率在年轻立地中较高(流通较快), 在年老的立地中则较低(流通较慢)。氮的再分配与立地年龄之间有很强的正相关, 而磷则相反。立地中养分储存、吸收和还原也是在 15 年立地中最高。养分循环和动态表明桉木-小豆蔻模式一次可持续 15 ~ 20 年, 之后再重新种植(Sharma *et al.*, 2002)。

通常认为, 凋落物掉到林地上被分解是养分从冠层进入土壤的主要途径。温带森林中, 每天大约有 70% 的养分通过凋落物返回到土壤中, 但是这很大程度上取决于树木的年龄。年轻的桉木比年老的桉木保留更多的大量元素。桉木林每天通过树叶凋落物向土壤输入的养分总量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-1}$) 是 N 183 ~ 232, P 4.9 ~ 7.0, K 33.5 ~ 39.5 和 Ca 9.2 ~ 10.8 (Sharma, 1993)。同一林地中凋落物的重量随立地年龄增加而增加, 因而林地的养分积累也随立地年龄而增加。桉木凋落物的降解模式为开始很慢, 中间很快, 最后又慢下来(Semwal *et al.*, 2003)。

与森林-小豆蔻混农林系统相比, 桉木-小豆蔻混农林系统地面凋落物较多。桉木-小豆蔻系统中桉木凋落物的贡献率为 39%, 小豆蔻 61%。每年凋落物的 57% 被降解, 43% 在地面上累积。森林-小豆蔻混农林系统中混合树种凋落物贡献率为 64%, 小豆蔻为 36%。森林-小豆蔻立地上的凋落物在地面的累积率为 49% (Sharma *et al.*, 1997)。

凋落物产量及其消失率在桉木-小豆蔻系统中比在森林-小豆蔻系统中分别高 1.59 和 1.79 倍 (Sharma *et al.*, 1997)。Binkley 等 (1992) 也发现与固氮植物红赤杨混合立地上的凋落物比与非固氮植物混合立地上的凋落物多。固氮植物凋落物一般比非固氮植物凋落物降解快, 并且固氮植物的凋落物可能加速其它类型凋落物的降解。Taylor 等 (1989) 也

发现了同样的规律,波叶桤木(*Alnus crispa*)的叶片凋落物在小袋子中需要大约 11.5 年就能降解 95%,而三倍体山杨(*Populus trimuloides*)的叶片凋落物需要 14.5 年。但是当杨属植物的凋落物与桤木属植物的凋落物混合后,降解速率与桤木属植物凋落物一样快。其原因可能是由于固氮树种的凋落物中氮含量较高,更适合微生物生长,因此降解速率较快。

2.4 快速改良土壤,防止土壤侵蚀和土地退化

林农轮作或刀耕火种是东南亚许多山地民族的主要耕作方式,主要包括毁林开荒、旱作和撂荒 3 个阶段的反复轮回,需要大量的森林作基础。在休耕早期,养分很快从土壤转移到植被中,尽管淋溶和径流大大地减少,但是土壤中的养分迅速降低。只有在 10 年的休耕再生后,土壤肥力才能恢复。因此,10 年的循环被认为是系统恢复的最短时间,除非休耕期能加速再生率(Ramakrishnan, 1992)。原始轮耕有着 15~20 年的休耕期,对于次生林的恢复没有阻碍作用,因此是一种与环境相协调的农业系统。随着人口的稳定增长和森林的国有化,许多森林无法被用来耕种,导致轮耕中的休耕期不断缩短,许多地方的轮耕已经与环境和经济不相协调(Rasul & Thapa, 2003)。越来越多的证据显示休耕期太短的轮耕实践会改变土壤理化性质(Alegre & Cassel, 1996; Juo & Manu, 1996; Holscher *et al.*, 1997),减少养分储量,并且加速土壤侵蚀(Baker, 1984; Gafur *et al.*, 2003)。

在刀耕火种循环的一个耕作期内可能丢失 $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的氮,而在随后 5 年的休耕期内能恢复的还不到一半。若在休耕期间,种植各种豆科和非豆科共生固氮树种(如 *Albizia* spp. 和 *A. nepalensis*) ,那么只需经过短期休耕就可以恢复土壤肥力(Ramakrishnan, 1992)。国内一些学者研究了轮耕的改良休闲制(Improvement fallow in shifting cultivation),即把速生的固氮树种(一般是灌木和小乔木种类)种植于刀耕火种的休闲地上,用固氮树种替代自然林休闲而迅速恢复土地生产力,缩短休闲周期。一般只需 3~6 年,即可清除固氮树种,种植农作物 1~3 年,地力减退后再种植固氮树种,如此循环往复(陈爱国等, 1995; 陈爱国和吴枫, 2000)。桤木这种固氮植物除寄生于根瘤内的固氮菌具固氮作用外,其叶也是良好的绿肥, 1000 kg 树叶干物质量的肥力相当于 14.3 kg 硫酸铵、 2.4 kg 过磷酸钙和 2.2 kg 硫酸钾,一般以鲜叶 $6000 \sim 7500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 代替 $15000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 水稻种植的有机圈肥(沈立新, 2003)。因此,用桤木替

代自然林休闲能够迅速恢复土地生产力,缩短休闲周期。

在印度喜马拉雅中部,桤木种植于海拔 1200 m 的退化的社区林地和丢荒的农地上。Maikhuri 等(2000)在这些丢荒的农地上种了一年生作物,并在旁边种上桤木,在传统农业实践之后,补充灌溉和增施有机肥。在 5 年的耕种期内,监测了桤木和农作物的成活率、高度、茎周长、冠幅、分枝数、地上生物量和土壤理化性质。研究显示桤木在退化林地和农业休耕地中的表现都很好,而且 5 年后,土壤的理化性质在两种系统中都有显著改进。

桤木在酸性淋溶土上冠幅宽,生长快,适应性好,在预防土壤侵蚀和土地滑坡方面起着重要作用(Dhyani & Tripathi, 1999),广泛应用于造林和森林恢复工程中(Sastry & Kavathekar, 1990)。在喜马拉雅中部 3 个不同年龄(3、6、8 年)的受山体滑坡危害的地方,Chaudhry 等(1996)研究了早期演替群落中 6 个植物种的生长状况。结果显示,桤木周围混生合适的植物种类能够加速裸地上的植被再生。由于桤木树苗具有最大干物质量,而且能通过根瘤向其它物种提供氮,这在自然演替和人工植被再生中都是一个重要属性,因此认为桤木是植被恢复的理想树种。

云南南部山区由于雨水多,新开的刀耕火种地易被雨水侵蚀,因此当地百姓在播种时,将桤木种子与陆稻种子同时撒播。到秋收时,虽然农作物被收割了,但留下的小树仍继续生长,起到收到粮食育好树,防止水土流失的效果(曾觉民, 1993)。

3 总结与展望

综合以上研究结果可以看出,桤木在传统农业生态系统中无论是轮作还是间作,其作用都十分显著。不仅增加系统生物量和氮含量,提高土壤肥力,而且能够加速系统中的养分循环,改善土壤理化性质,防止土地退化和土壤侵蚀。单纯从发展山区农业方面考虑,以桤木作为休耕树种时,休耕期应最多不超过 7 年,而以桤木作为间作树种时,桤木林的利用周期可延长至 15~20 年。

虽然关于桤木的研究成果众多,但仍旧存在问题。Sharma 和 Ambash(1986)的研究显示桤木林在 7 年时其氮增加量最高($117 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),之后随着立地年龄增长,桤木林对系统的氮含量的贡献率逐渐减少。这给我们一个启示,在利用桤木作为休耕树种时,目的都是为了缩短休耕期,那么是不是休

耕 7 年才是最好呢?为什么有些学者认为休耕 4 ~ 5 年(尹绍亭, 1990)就足够了呢?如何才能将缩短休耕期和达到农作物最佳产量形成最优组合?这些问题都需要进一步研究。

Sharma 等(2002)的结果显示桤木-小豆蔻年氮固定量在 15 年生立地上才达到高峰(155 kg · hm⁻²),与前述 Sharma 和 Ambash(1986)的研究结果存在显著差异。不难看出,桤木在与小豆蔻间作后,其固氮潜力比单纯桤木林有极大地提高,不仅有数量上的增加,而且在时间上也延长了一倍还多。这说明单纯的桤木林生长时间过长,对其共生固氮菌的固氮效率有抑制作用,而若将其与非固氮农作物间作或混作,则可通过农作物对氮元素的吸收,使土壤氮含量持续保持较低水平,刺激固氮酶更长时间地保持较高活性。因此可以说,将桤木与农作物间作或混作能更好地发挥桤木的固氮作用。但是据 Dhyani 和 Tripathi(1999)的研究结果看来,桤木在与农作物间作的 7 年时期内,作物的产量有所减少,而当作物与树木距离加大,则产量有所增加。这一方面是由于冠层的遮荫效应,另一方面也因为树木根系对养分和水分的竞争。因此在选择与桤木间作或混作时,为了不让其影响农作物对阳光的需求,并保证农作物和桤木都能有足够的养分和水分供应,应该采取何种种植模式,株行距如何确定,还需深入研究。

毋庸置疑,桤木的利用将为山区发展可持续农业和保护生态环境提供可能。

参 考 文 献

- Akkermans ADL, van Dijk C (1981). Non-leguminous root-nodule symbioses with actinomycetes and *Rhizobium*. In: Broughton WJ ed. *Nitrogen Fixation*, Vol. 1. *Ecology*. Oxford University Press, London, 57 - 103.
- Alegre JC, Cassel DK (1996). Dynamics of soil physical properties under alternative systems to slash-and-burn. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 58, 39 - 48.
- Atta-Krah AN (1990). Alley farming with *Leucaena*: effect of short grazed fallows on soil fertility and crop yields. *Experimental Agriculture*, 261, 1 - 10.
- Baker R (1984). Protecting the environment against the poor. *Ecologist*, 14, 53 - 60.
- Bartlett AG (1992). A review of community forestry advances in Nepal. *Commonwealth Forestry Review*, 71, 95 - 100.
- Binkley D (1983). Interaction of site fertility and red alder on ecosystem production in Douglas-fir plantation. *Forest Ecology and Management*, 5, 215 - 227.
- Binkley D, Sollins P, Bell R, Sachs D, Maold D (1992). Biogeochemistry of adjacent conifer and alder/conifer stands. *Ecology*, 73, 2022 - 2033.
- Bond G (1976). The results of the IBP survey of root-nodule formation in non-leguminous angiosperms. In: Nutman PS ed. *Symbiotic Nitrogen Fixation in Plants*. Cambridge University Press, London, 443 - 474.
- Cairns M, Keitzar S, Yaden A (1997). Shifting forests in Northeast India: management of *Alnus nepalensis* as an improved fallow in Nagaland. In: Cairns MF ed. *Indigenous Strategies for Intensification of Shifting Cultivation in Asia-Pacific*. Proceedings of a regional conference held in Bogor, Indonesia on June 23 - 27, 1997. International Centre for Research in Agroforestry, Chiang Mai, Thailand
- Chaudhry S, Singh SP, Singh JS (1996). Performance of seedlings of various life forms on landslide-damaged forest sites in Central Himalaya. *Journal of Applied Ecology*, 33, 109 - 117.
- Chen AG (陈爱国), Wu F (吴枫) (2000). Nitrogen fixation tree and agroforestry systems. *World Forestry Research* (世界林业研究), 13(2), 20 - 23. (in Chinese)
- Chen AG (陈爱国), Zou SQ (邹寿青), Liu HM (刘宏茂), Li QJ (李庆军), Duan QW (段其武) (1995). A study on classification of agroforestry systems in Yunnan tropical areas. *Journal of Southwest Forestry College* (西南林学院学报), 15(2), 8 - 14. (in Chinese with English abstract)
- Dhyani SK (1998). Tribal alders: and agroforestry system in the northeastern hills of India. *Agroforestry Today*, 10(4), 14 - 15.
- Dhyani SK, Tripathi RS (1999). Tree growth and crop yield under agrisilvicultural practices in north-east India. *Agroforestry Systems*, 44, 1 - 12.
- Dhyani SK, Tripathi RS (2000). Biomass and production of fine and coarse roots of trees under agrisilvicultural practices in north-east India. *Agroforestry Systems*, 50, 107 - 121.
- Fu H (付洪), Chen AG (陈爱国) (2004). Accumulation of above-ground biomass and nutrients in swidden fallows: a comparison between planted alder fallows and unmanaged grassy fallows in Yunnan. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 24, 209 - 214. (in Chinese with English abstract)
- Gafur A, Jensenb JR, Borggaardc OK, Petersend L (2003). Runoff and losses of soil and nutrients from small watersheds under shifting cultivation (Jhum) in the Chittagong Hill tracts of Bangladesh. *Journal of Hydrology*, 274, 30 - 46.
- Guo HJ (郭辉军) (1993). *Agroforestry Systems in Baoshan, Yunnan, Southwest China* (云南省保山地区混农林系统调查研究). Yunnan University Press, Kunming, 59 - 69. (in Chinese)
- Guo HJ, Xia YM, Padoch C (1997). *Alnus nepalensis*-based agroforestry systems in Yunnan, Southwest China. In: Cairns MF ed. *Indigenous Strategies for Intensification of Shifting Cultivation in Asia-Pacific*. Proceedings of a regional conference held in Bogor, Indonesia on June, 23 - 27, 1997. International Centre for

- Research in Agroforestry, Chiang Mai, Thailand.
- Holscher D, Ludwig B, Moller RF, Folster H (1997). Dynamics of soil chemical parameters in shifting agriculture in Eastern Amazon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 66, 153 – 163.
- Juo ASR, Manu A (1996). Chemical dynamics in slash-and-burn agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 58, 49 – 60.
- Kass DL, Arya SJS, Sanchez JO, Pinto LS, Ferreira P (1992). Ten years experience with alley farming in Central America. *Plant and Soil*, 63, 165 – 179.
- Liu AR (刘爱荣), Wu DY (吴德友), Li LJ (李立俊) (1996). Pilot study to fire obstructing function of natural forest of *Alnus nepalensis*. *Forest Fire Prevention (森林防火)*, 48(1), 11 – 12, 34. (in Chinese)
- Long CL (龙春林), Li H (李恒), Dao ZL (刀志灵), Zhou YL (周翊兰) (1999). Ethnobotanical studies in Gaoligong Mountains. I. The Lemo people. *Acta Botanica Yunnanica (云南植物研究)*, 6, 131 – 136. (in Chinese with English abstract)
- Long CL (龙春林), Li R (李嵘), Liu YT (刘怡涛), Dao ZL (刀志灵), Li H (李恒) (2004). Natural resource management in the Dulong ethnic community. *Acta Botanica Yunnanica (云南植物研究)*, 15 (Suppl.), 34 – 41. (in Chinese with English abstract)
- Maikhuri RK, Semwal RL, Rao KS, Saxena KG (1997). Rehabilitation of degraded community lands for sustainable development in Himalaya: a case study in Garhwal Himalaya, India. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 4, 192 – 203.
- Maikhuri RK, Semwal RL, Rao KS, Singh K, Saxena G (2000). Growth and ecological impacts of traditional agroforestry tree species in Central Himalaya, India. *Agroforestry Systems*, 48, 257 – 272.
- Myers RJK, Palm CA, Cuevas E, Gunatilleke IUN, Brossard M (1994). The synchronization of nutrient mineralization and plant nutrient demand. In: Woomer PL, Swift MJ. *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. John Wiley, Chichester, 81 – 116.
- Neil PE (1990). *Alnus nepalensis*—a multipurpose tree for the tropical highlands. In: NFTA 90-06. <http://www.winrock.org/forestry/factpub/FACTSH/A-nepalensis.html>. Cited in 22 Jan. 2005.
- Pradhan M (1993). Studies on interaction between VAM fungi and Frankia in non-leguminous tree species (*Alnus* sp.) of North-east India. PhD dissertation, North Eastern Hill University, Shillong.
- Ramakrishnan PS (1992). *Shifting Agriculture and Sustainable Development: an Interdisciplinary Study from North-Eastern India*. UNESCO-MAB Series, Paris, Parthenon Publication, Carnforth, Lancs. (republished by Oxford University Press, New Delhi, 1993)
- Rao KS, Saxena KG (1996). Minor forest products' management: problems and prospects in remote high altitude villages of central Himalaya. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 3, 60 – 70.
- Rasul G, Thapa GB (2003). Shifting cultivation in the mountains of South and Southeast Asia: regional patterns and factors influencing the change. *Land Degradation & Development*, 14, 495 – 508.
- Salazar A, Szott LT, Palm CA (1993). Crop-tree interactions in alley cropping systems on alluvial soils of the Upper Amazon Basin. *Agroforestry Systems*, 22, 67 – 82.
- Sastry TCS, Kavathekar KR (1990). *Plants for Reclamation of Wastelands*. New Delhi Publication and Information Directorate, New Delhi, 684.
- Schwintzer CR, Berry AM, Disney LD (1982). Seasonal patterns of root nodule growth, endophyte morphology, nitrogenase activity, and shoot development in *Myrica gale*. *Canadian Journal of Botany*, 60, 747 – 757.
- Semwal RL, Maikhuria RK, Raob KS, Senb KK, Saxenac KG (2003). Leaf litter decomposition and nutrient release patterns of six multipurpose tree species of Central Himalaya, India. *Biomass & Bioenergy*, 24, 3 – 11.
- Sharma E (1993). Nutrient dynamics in Himalayan alder plantations. *Annals of Botany*, 72, 329 – 336.
- Sharma E, Ambasht RS (1984). Seasonal variation in nitrogen fixation by different ages of root nodules of *Alnus nepalensis* plantations in the Eastern Himalayas. *Journal of Applied Ecology*, 21, 265 – 270.
- Sharma E, Ambasht RS (1986). Root nodule age class transition, production and decomposition in an age sequence of *Alnus nepalensis* plantation stands in the Eastern Himalaya. *Journal of Applied Ecology*, 23, 689 – 701.
- Sharma E, Ambasht RS (1988). Nitrogen accretion and its energetics in the Himalayan alder. *Functional Ecology*, 2, 229 – 235.
- Sharma E, Sharma R, Pradhan M (1998). Ecology of Himalayan alder (*Alnus nepalensis* D. Don). *Proceedings of the Indian National Science Academy*, B64, 59 – 78.
- Sharma E, Sharma R, Singh MP (1985). Chemical soil properties under five age series of *Alnus nepalensis* plantations in the Eastern Himalayas. *Plant and Soil*, 84, 105 – 113.
- Sharma R, Sharma E, Purohit AN (1994). Dry matter production and nutrient cycling in agroforestry systems of cardamom grown under *Alnus* and natural forest. *Agroforestry Systems*, 27, 293 – 306.
- Sharma R, Sharma E, Purohit AN (1997). Cardamom, mandarin and nitrogen-fixing trees in agroforestry systems in India's Himalayan region. I. Litterfall and decomposition. *Agroforestry Systems*, 35, 239 – 253.
- Sharma G, Sharma E, Sharma R, Singh KK (2002). Performance of an age series of *Alnus-Cardamom* plantations in the Sikkim Himalaya: nutrient dynamics. *Annals of Botany*, 89, 261 – 272.
- Shen LX (沈立新) (2003). Study on the fallow and intercropping system of *Alnus nepalensis* on the mountains of Himalayan region.

- Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 11 (1), 148 – 149. (in Chinese with English abstract)
- Singh G, Singh NT, Dagar JC, Singh H, Sharma VP (1997). An evaluation of agriculture, forestry and agroforestry practices in a moderately alkali soil in northwestern India. *Agroforestry Systems*, 37, 279 – 295.
- Szott LT, Palm CA, Sanchez PA (1991). Agroforestry in acid soils of the humid tropics. *Advances in Agronomy*, 45, 275 – 301.
- Tang Y (1999). Use of nitrogen-fixing plants in soil conservation and soil fertility improvement-prospect. In: Soil Fertility Issues in the Hindu Kush-Himalayas, Newsletter No. 32. <http://www.icimod.org/publications/newsletter/News32/news32f.htm>. Cited 24 Jan. 2005.
- Taylor BR, Parsons WFJ, Parkinson D (1989). Decomposition of populus tremuloides leaf litter accelerated by addition of *Alnus crispa* litter. *Canadian Journal of Forest Research*, 19, 674 – 679.
- Troup RS (1921). *The Silviculture of Indian Trees*, Vol III. *Lauraceae to Coniferae*. Clarendon Press, London, UK, 912.
- World Agroforestry Centre (2005). Agroforestry Database. <http://www.worldagroforestry.org/Sites/TreeDBS/Aft/speciesinfo.cfm?ID=196>. Cited 22 Jan. 2005.
- Yamoah CF, Agboola AA, Wilson GF (1986). Nutrient contribution and maize performance in alley cropping systems. *Agroforestry Systems*, 4, 247 – 254.
- Yin ST (尹绍亭) (1990). Dissertation of slash and burn cultivation in the present age—appended with the relationship between human and nature. *Agricultural Archaeology* (农业考古), (1), 11 – 19. (in Chinese)
- Yin ST (尹绍亭) (2000). *People and Forests—Yunnan Swidden Agriculture in Human—Ecological Perspective* (人与森林——生态人类学视野中的刀耕火种). Yunnan Education Publishing House, Kunming. (in Chinese)
- Zeng JM (曾觉民) (1993). Types and evaluation of agroforestry in southwest mountain area. *Ecological Economic* (生态经济), (6), 30 – 38. (in Chinese with English abstract)
- Zhao L (赵磊) (1991). Good fast growing tree—Alder. *Forest Inventory and Planning of Yunnan* (云南林业调查规划), (2), 57 – 60. (in Chinese)
- Zhao ZW (赵之伟), Zhang B (张兵), Xie GB (谢光宝) (1992). The microscopic structure of *Alnus nepalensis*. *Journal of Yunnan University* (Natural Science Edition) (云南大学学报 (自然科学版)), 14, 398 – 400. (in Chinese with English abstract)

责任编辑 张丽赫