

川西亚高山云杉人工林土壤质量性状演变

庞学勇¹, 刘 庆^{1*}, 刘世全², 吴 彦¹, 林 波¹, 何 海^{1,3}, 张宗锦²

(1. 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041; 2. 四川农业大学, 雅安 625014; 3. 重庆师范学院生物系, 重庆 400047)

摘要:通过对川西亚高山云杉人工林不同演替阶段土壤肥力质量性状的研究,结果表明,人工云杉林土壤肥力退化与土壤有机质有关,在人工云杉林地中,随着抚育林龄的增加,土壤全 N、碱解 N、全 P、腐殖质、HA、FA、CEC、EB、微生物总数、细菌及真菌数量随有机质的减少而降低,土壤最大持水量、毛管持水量及总孔隙和毛管孔隙则先减少,之后随着云杉自疏而有上升的趋势,毛管持水量是决定林地自然含水量的主要因子。土壤 K 素和酶活性变化较复杂,钾素主要与土壤母质有关,酶活性主要与林地微生态环境有关。土壤综合肥力评价表明,土壤综合肥力指标(*IFI*)从人工云杉幼林向成熟林演替时,先迅速下降,之后随云杉自疏而缓慢上升,表现出非正“U”型的变化。解决当前人工成熟云杉林土壤退化的主要措施应因地制宜地进行间伐或轮伐,改善林地的微生态条件,尽量避免营造针叶纯林,建议营造针阔混交林。

关键词:川西; 亚高山针叶林; 人工云杉林; 土壤肥力质量; 综合评价

Changes of soil fertility quality properties under subalpine spruce plantation in Western Sichuan

PANG Xue-Yong¹, LIU Qing^{1*}, LIU Shi-Quan², WU Yan¹, LIN Bo¹, HE Hai^{1,3}, ZHANG Zong-Jin² (1. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Sichuan Agriculture of University, Yaan 625014, Sichuan, China; 3. Department of Biology, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China). *Acta Ecologica Sinica*. 2004, 24(2): 261~267.

Abstract: Western Sichuan is an important subalpine coniferous forest of Sichuan, China. As it is mainly distributed in Jinshajiang River, the upper reaches of the Yangtze River and its tributary, the Yalongjiang and Minjiang Rivers, it plays a very important role in water conservation and soil protection in this area. Moreover, it also has a crucial influence on local economy and ecological balance, and can further affect the drainage areas of the middle and lower reaches of the Yangtze River. Since 1940's, natural coniferous forests are being cleared, and spruce forests are planted on clear felled areas in succession. Till now there are about 4.3×10^4 hm² of spruce plantation in this region. However, these stands of monoculture have led to the degradation of forest ecosystem functions.

A study was carried out to evaluate the degree of soil degradation in artificial coniferous forest ecosystem near Miyaluo. The area is located on high mountain valley and belongs to transitional zone from Qinghai-Tibet plateau to Sichuan basin.

Soil fertility quality properties of spruce plantation were studied by applying the method of spatial sequence instead of time successional sequence. The results showed that degradation of soil fertility of spruce plantation was mainly related to reduction of soil organic matter. Litter decomposition was slowed down with increase of spruce plantation age. Total soil N, alkali-hydrolyzable N, total P, humus, humic acid(HA), fulvic acid(FA), capacity of exchangeable cation(CEC), exchangeable base

基金项目:国家重点基础研究发展规划专题资助项目(G2000046802-05;G199804814);中国科学院知识创新工程重大资助项目(KSCX1-07-02);“十五”国家重大科技攻关课题资助项目(2001BA606A-05);“西部之光”人才计划资助项目

收稿日期:2002-10-29;修订日期:2003-04-20

作者简介:庞学勇(1974~),男,四川巴中人,硕士,主要从事土壤生态和退化生态系统的恢复与重建工作。E-mail: pangxy@cib.ac.cn

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: liuqing@cib.ac.cn

Foundation item: the State Key Basic Research and Development Plan of China (No. G2000046802-05, G199804814), the Knowledge Innovation Project of the CAS (No. KSCX1-07-02), the Key Project of “Tenth Five-year” Program (No. 2001BA606A-05) and the Talent Plan of the CAS

Received date:2002-10-29;**Accepted date:**2003-04-20

Biography: PANG Xue-Yong, Master, mainly engaged in the research of soil ecology, restoration and rehabilitation of degraded ecological systems. E-mail: pangxy@cib.ac.cn

(EB) and amount of microbes, bacteria, fungi sharply decreased in topsoil. Soil saturation capacity, capillary capacity, total porosity and capillary porosity decreased from young forest to mature forest stage. After spruce reached mature forest stage, competition between species intensified and microenvironment became better in artificial forest, slowly recovering the soil physical properties. Natural water content was mainly related to capillary porosity of topsoil in spruce plantations. During spruce plantation regeneration, changes of soil K and enzyme activity were complex; soil K was mainly related to parent material and soil enzyme activity was mainly affected by forest micro-environment.

Soil physical factors (moisture content, bulk density, total porosity, capillary porosity, aggregate degree, silt and clay), chemical factors (OM, total N, alkali-hydrolyzable N, total P, humus and HA/FA) and biological factors (urease, acid phosphatase, invertase and microbes) were selected as evaluation index system of soil fertility. Soil integrated fertility index (*IFI*) of spruce plantation was calculated using principal component analysis (PCA, spss10.0 & Matlab6.0). The values of soil *IFI* showed an order of 10a spruce forest (2.298)>clear felled areas (1.219)>natural forest (1.062)>30a spruce forest (0.174)>20a spruce forest (−0.306)>50a spruce forest (−0.715)>60a spruce forest (−0.913)>40a spruce forest (−1.542). The results showed the trend of soil *IFI* changes was partially a “U” shape, namely, in the course of artificial spruce forest succession, soil *IFI* decreased sharply at the initial stage, after crown closed, soil *IFI* recovered slowly and will finally reach soil *IFI* of natural coniferous forest. However, this recovery process is quite slow.

Based on above-mentioned results, the strategy and measures to prevent the soil degradation of artificial spruce mature forest and to improve the site ecological environment were put forward, including application of thinning rationally for existing dense plantations and establishment of mixture forest of conifer and broadleaf trees for new plantations.

Key words: Western Sichuan; subalpine coniferous forests; spruce plantation; soil fertility quality; comprehensive evaluation
文章编号:1000-0933(2004)02-0261-07 中图分类号:Q948.1,S151,S154.1,S714 文献标识码:A

四川西部亚高山针叶林是四川森林的主体,主要分布在长江上游的金沙江及支流雅砻江、岷江等流域,是长江上游重要的水源涵养和水土保持林,对该区域以及长江中、下游地区的生态平衡起着重大调节作用。但自 20 世纪 40 年代以来,该区域原始林被大规模采伐,其生态屏障功能逐步减弱,随后陆续在皆伐迹地上营造云杉林进行人工恢复,目前约有 $4.3\times10^4\text{ hm}^2$ 云杉林已郁闭成林^[1]。近年来对人工林恢复过程中的群落结构动态^[2]、养分循环特征^[3]以及生物多样性对土壤性质的影响^[4]等方面进行了相关研究,阐述了针叶林人工恢复过程中存在物种配置单一、土壤退化严重^[3,5]等问题,人工林生态系统表现出典型的退化特征,但对人工林演替过程中土壤肥力质量演变规律未作探讨。

土壤作为森林生态系统的组成成分和环境因子^[6],为森林的生长发育、繁衍生息提供了必要的环境条件、调节着系统内外水分的分配、起着有效的环境过滤器的作用^[7]。土壤在森林生态系统中的这些功能决定于土壤的质量,它是森林生态系统可持续发展的基础;同时,生态系统组成、结构与功能的变化又影响和制约着土壤质量演化的方向和强度。研究现行人工林培育技术条件下土壤质量演变规律及机制是建立科学的土壤质量调控体系的基础与前提,也是近年来国际土壤学研究的热点与前沿^[7]。

本文选择川西亚高山原始针叶林砍伐后人工抚育的云杉林下土壤为研究对象,从土壤物理、化学和生物学性质角度,对演替各阶段土壤肥力进行多因子综合比较,分析云杉人工林群落演替过程中土壤肥力性状变化规律,以期为退化生态系统的恢复和重建提供一定的理论依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区域概况

研究区位于四川省理县米亚罗林区,北纬 $31^{\circ}35'$,东经 $102^{\circ}35'$,海拔 2850~4200m,属于青藏高原向四川盆地过渡的高山峡谷区。夏季温凉多雨,冬季寒冷干燥,1 月均温为 -8°C ,7 月均温为 12.6°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年积温为 1200~1400 $^{\circ}\text{C}$,年降水量为 600~1100mm,年蒸发量为 1000~1900mm,属季风性山地气候^[1]。成土母岩主要为千枚岩、板岩和白云岩等残坡积风化物,土壤自低到高依次为棕壤(2700~3000m)、暗棕壤(3300~3600m)、棕色针叶林土(3600~3850m)、亚高山草甸土(3850m 以上)。主要乔木有川西云杉(*Picea likiangensis*)、鳞皮冷杉(*Abies squamata*)和红桦(*Betula albo-sinensis*)等;主要灌木有悬钩子(*Rubus* sp.),疏花槭(*Acer laxiflorum*)、红毛五加(*Acanthopanax giraldii*)、散生子(*Cotoneaster davaricatus*)、扁刺蔷薇(*Rosa sweginzowii*)、紫花卫矛(*Euonymus porphyreus*)、川滇高山栎(*Quercus aguiifolioides*)等。主要草本有唐松草(*Thalictrum uncatum*)、蟹甲草(*Cacalia roborowskii*)、冷蕨(*Cystopteris fragilis*)、苔草(*Carex* sp.)、柳叶菜(*Epilobium laetum*)和禾本科多属等^[1,3,5]。本研究数据来源于研究区砍伐迹地人工更新后的一系列云杉林,乔木层较单一,灌木大都被人工抚育清灌过程砍伐掉,主要种有川滇高山栎(*Quercus aguiifolioides*)、红毛五加(*Acanthopanax giraldii*)、疏花槭(*Acer laxiflorum*)等,草本较稀疏。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 土壤质量可以从土壤内在属性或土壤的功能两方面去认识^[8],本研究仅从土壤内在属性去研究。研究现行人工林生长过程中土壤质量性状演变的理想方法是在相同的样地上进行长期的定位试验。然而,由于森林生长的生育期长达数十年,从事这样的研究需要大量的资金和长期的时间投入^[9]。因此,本研究在理县米亚罗附近,选择立地条件基本一致,不同年代更新人工云杉林(10、20、30、40、50、60年生云杉林)土壤为研究对象。

人工林均为在皆伐迹地上种植云杉,初植株行距为 1.5m×1.5m,大约在 20~30a 时林地郁闭,之后每 3~5a 进行抚育一次,主要措施为清除林下灌丛和对云杉修枝等。在样地选择时,尽量选择地形要素(坡度、坡向、坡长与坡形)、土壤与成土母质的类型基本一致,以便使它们在更新前后具有同源性和一致性^[9]。在此基础上,选择的样地基本情况见表 1。

表 1 云杉人工林与天然林样地基本情况

Table 1 Characteristics of the artificial spruce woodland and natural spruce woodland								
林地类型 ^① Stand	林龄(a) Forest age	海拔(m) Altitude	坡向(°) Aspect	坡度(°) Slope	母岩 Native rock	平均树高(m) Average height	郁闭度 Canopy density	植物种数及盖度 ^② Plant species and coverage
I	70~72	3210	SW60	33	板岩 Slate	24.2	0.70	乔 10 盖度 56,灌 6 盖度 57,草 9 盖度 46
II	~	3200	NE40	40	千枚岩 Phyllite	1.0	0.50	乔 2 盖度 10,灌 6 盖度 60,草 12 盖度 80
III	8~9	3240	NE35	40	千枚岩 Phyllite	2.2	0.60	乔 3 盖度 25,灌 6 盖度 50,草 9 盖度 90
IV	18~21	3205	SW68	25	千枚岩 Phyllite	3.4	0.75	乔 3 盖度 70,灌 3 盖度 40,草 5 盖度 40
V	28~31	3230	SW55	30	千枚岩 Phyllite	7.4	0.90	乔 2 盖度 88,灌 3 盖度 17,草 3 盖度 20
VI	40~42	2800	SW75	35	板岩 Slate	10.7	0.75	乔 2 盖度 70,灌 2 盖度 15,草 3 盖度 12
VII	50~52	3310	SW78	15	千枚岩 Phyllite	12.6	0.85	乔 1 盖度 82,灌 1 盖度 10,草 2 盖度 17
VIII	54~58	3110	SW55	30	板岩 Slate	17.5	0.90	乔 2 盖度 80,灌 3 盖度 15,草 7 盖度 10

① I 天然云杉林 Natural spruce forest; II 迹地 Clear felled areas; III、IV、V、VI、VII、VIII 分别代表 10、20、30、40、50、60 年生人工云杉林,下同 Spruce plantation of 10, 20, 30, 40, 50 and 60a, respectively,the same below;② 乔(乔木) Tree,灌(灌木) Shrub,草(草本) Herb,盖度(%) Coverage

1.2.2 研究方法 在 2001 年 6 月 1 日~20 日,野外选择有代表性的样地,样地内同时进行土壤、植被以及样地立地情况调查,并采集配套的土壤理化分析及生物学性质分析样品。在每个样方内随机挖 2 个典型土壤剖面,按土壤发生学层次(A、B 层)分 2 层观察记录,野外测定土壤自然含水量、容重、土壤持水性能等,分层采土壤理化分析样品,每个重 1 kg 左右,装入布袋中,带回室内风干处理,同时采集配套的土壤微生物区系分析样品,每个重 200 g 左右,用冰瓶保鲜法带回立即分析。

细菌、真菌、放线菌均采用稀释平板法,接种稀释度分别为 10^{-4} ~ 10^{-6} 、 10^{-3} ~ 10^{-5} 、 10^{-1} ~ 10^{-3} ,每个稀释度重复 3 次,培养基:细菌用牛肉蛋白胨,真菌用马丁氏培养基,放线菌用淀粉铵培养基^[10,11];蔗糖酶;3、5-二硝基水杨酸比色法,脲酶:扩散法,磷酸酶:磷酸苯二钠比色法^[12];土壤理化性质均采用常规分析^[13]。

1.2.3 数据分析 各演替阶段土壤肥力指标值按各样地取平均值,土壤肥力综合指标值(*IFI*)计算从土壤物理、化学和生物学性质出发,选择具有代表性和对植被影响有主导性的单项肥力指标,然后对选择指标采用 SPSS10.0 标准化,并求出各肥力因子的相关矩阵,再利用 MATLAB6.0 软件计算各肥力因子主成分的贡献率和累计贡献率,以各主成分特征贡献率为权重,加权计算各演替阶段土壤肥力指标值^[21]。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质

2.1.1 土壤持水状况 土壤持水供水能力是土壤团聚体、孔隙状况及结构性能的综合反映。从图 1 可以看出,原始林被砍伐后形成迹地,再到 10 年生云杉幼林阶段,林地光照条件好,凋落物分解快,土壤结构性能改善,土壤表层饱和持水量、毛管持水量和自然含水量逐渐增大,随着人工林龄的增加,林地郁闭度增大(表 1),加之人工纯林凋落物以针叶为主,分解缓慢^[5],土壤有机质含量降低,导致土壤表层饱和持水量、毛管持水量和自然含水量逐渐减小,在 40 年生云杉林地达最低值,之后,随着云杉自疏,土壤持水能力稍有改善。可见,人工云杉林地土壤持水状况主要与林地微环境和凋落物分解快慢有关。

2.1.2 土壤孔隙状况 土壤孔隙的大小、数量及分布是土壤物理性质的基础,也是评价土壤结构特征的重要指标。从图 2 可以看出,土壤总孔隙和毛管孔隙,迹地和人工幼林大于天然云杉林(I),人工云杉幼林向成熟林演替阶段,土壤总孔隙和毛管孔隙降低,到 40 年生人工云杉林地时达最低值,且分别比 10 年生人工云杉林地表层土壤低 15.84%、10.03%和 5.81%,随着抚育林龄的进一步增加,土壤孔隙又有所增加。从林地水分实际占有孔隙度分析,仅为毛管孔隙度的一部分,毛管孔隙中有相当一部分为空气所填充,数据表明川西亚高山针叶人工云杉林地土壤实际贮水能力远大于林地现有水分贮量,表现出林地土壤干燥现象。

由此分析,人工云杉林在开始阶段并没有表现出森林植被具有较强的改善土壤孔隙状况的能力,反而随着森林植被郁闭度

的加大,土壤总孔隙减少。主要原因可能为森林郁闭度加大,林内光照弱,水分条件差,凋落物分解缓慢,导致土壤有机质减少,从土壤有机质与土壤总孔隙相关分析表明,它们呈明显的正相关($r=0.669^{**}$, $n=62$),可以得到验证。随着云杉林龄进一步的增加,即云杉林龄达 30~40a 时^[3],开始出现自疏,林地光照、水分条件改善,林地凋落物分解加快,土壤有机质增加,土壤结构改善,总孔隙稍有增加。

2.2 土壤有机质及主要养分

土壤有机质是评价土壤肥力的一项重要指标,与多种土壤养分相关,同时对土壤持水供水能力、孔隙度和团聚度等物理性质有重要的影响。从图 3 可以看出,人工云杉林随着恢复过程的演替,林地有机质呈下降趋势。0~10 年生云杉林土壤有机质含量高可能原因为继承了原始林累积的大量凋落物,且原始林被砍伐后,林地光照、水分条件改善,微生物和土壤动物活动加强,故凋落物分解快,土壤的有机质含量增多。随着云杉林龄的增加,林地郁闭度增大,林地光照和水分条件变差,微生物活动减弱(图 7),凋落物分解慢而难以归还,有机质呈下降趋势。大约云杉在 40a 时出现自疏,凋落物分解又加快,但可能由于凋落物的分解对有机质的补充不能补偿矿化作用和植物生长吸收的消耗,故土壤的有机质下降还在进行。

土壤全 N(x_1)、碱解 N(x_2)与土壤有机质含量(x_3)呈极显著性正相关($r_{13}=0.920^{**}$, $r_{23}=0.922^{**}$, $n=62$),土壤全 N、碱解 N 的变化趋势与有机质变化趋势一致(图 3、图 4)。由于土壤有机质和 N 素均来源于凋落物,故受到凋落物分解率的影响。

土壤中全 P 与 N 素有很大的差别,一部分来源于成土母质,因此磷在生态系统中物质循环不如氮素强烈。从图 3 可以看出,磷在人工云杉幼林阶段,由于凋落物分解转化快,物质循环强烈,故土壤中磷素含量较高,但在成熟人工纯林阶段,林地光照、水分条件差,归还的营养元素主要贮存在凋落物中而难以进入土壤,土壤中磷素含量较低。特别是有效 P,在常规条件下无法检测出。

图 3 表明,云杉人工林土壤中全 K 随着抚育林龄的增加没有明显的变化。由于土壤中 K 素主要来源于母质,参与土壤中 K 素循环的是速效 K,它只占土壤中 K 素的极少部分,相关分析表明,速效 K 与土壤中有机质呈显著性正相关($r=0.440^{**}$, $n=62$),说明有机质的积累仍有助于 K 素的生物循环,使其避免淋溶失。随着人工云杉林龄的增加,土壤有机质含量降低,势必导致速效 K 含量降低(图 4)。

2.3 土壤腐殖质组成及交换性能

土壤腐殖质是有机物在土壤酶及微生物作用下形成的,并在一定的条件缓慢分解释放养分供植物生长,而且对土壤理化性质也有很大的影响,对评价林地土壤肥力有重要作用^[14]。从图 5 可以看出,各林地土壤中腐殖质总 C、胡敏酸(HA)和富里酸(FA)与有机碳变化趋势极为一致,即随着人工云杉林龄的增加,土壤腐殖质、HA 和 FA 含量降低,可能云杉人工纯林种植密度过大,林地微生态环境差,土壤生物学活性低,与凋落物分解慢有关。

土壤阳离子交换量(CEC)是反映土壤保持养分和缓冲能力的重要指标。图 6 表明,原始林被砍伐后形成迹地,土壤 CEC 降低,人工云杉林随着抚育林龄的增加土壤 CEC 降低,在云杉 40a 时达最低值,之后缓慢增加。其结果与土壤有机质的变化趋势极为相似,说明云杉人工林土壤 CEC 的变化取决于土壤有机质的演变。土壤交换性盐基(EB)与 CEC 变化趋势一致,即随着

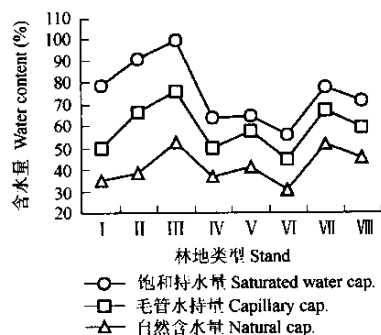


图 1 土壤持水状况

Fig. 1 The condition of soil moisture capacity

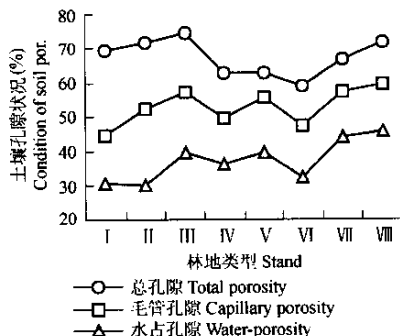


图 2 土壤孔隙状况

Fig. 2 The condition of soil porosity

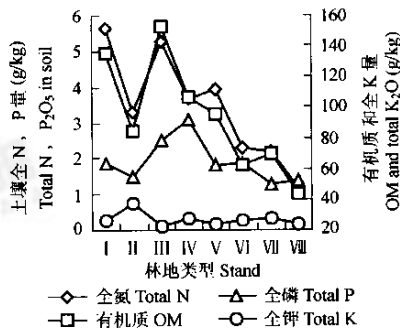


图 3 土壤表层有机质、全 N、P₂O₅ 和 K₂O 含量

Fig. 3 The content of organic matter, total N, total P₂O₅, K₂O in surface soil

人工云杉从幼林向成熟林演替,土壤中交换性盐基养分被植物吸收,返回地面的凋落物又难以分解^[3],土壤EB降低。土壤水解性酸在人工云杉各林地之间无明显差异,土壤无酸化现象。

2.4 土壤生物学性质

2.4.1 土壤微生物数量 土壤微生物是森林生态系统中最重要的重要组成部分之一,在森林的物质和能量循环中占有特别重要的地位。图7表明,川西亚高山人工云杉林土壤微生物区系以细菌为主,占微生物总数的96%以上,其次为真菌,放线菌数量最少。土壤微生物总数随森林演替,各林地微环境改变,其数量存在明显差异。在人工云杉幼林阶段,林地光照、土壤水分优于原始林,土壤微生物数量最高,随着人工云杉林龄的增加,森林郁闭度增大,林地微环境变差,微生物数量降低,60年生云杉林土壤表层微生物数量仅为10年生云杉林的36.85%。由于细菌占微生物总数的绝大多数,其变化趋势与总数一致。真菌在针叶林地凋落物分解中有特殊作用^[15~17],10年生云杉林地继承了原始林积累的大量凋落物,加之光照和土壤水分条件好,其真菌数量最高,随着人工抚育林龄的增加,林地郁闭度增大,真菌活动减弱,数量降低,到40年生云杉出现自疏以后,为前期积累的凋落物分解创造了条件,真菌数量又增大,随后由于林地郁闭度增大其数量又开始降低。放线菌数量在各林地之间差异不大,但仍以10年生云杉林和出现自疏时的40年生云杉地最高,可能与其土壤通气性有关。总之,微生物三大类群数量的变化反映了人工云杉林地微环境的变化。

2.4.2 土壤酶活性 林地土壤中一切生物化学活动都是在土壤酶作用下完成的,土壤酶活性大小与土壤肥力密切相关^[16,17]。图8表明,不同林地之间土壤酶活性表现出不同的差异,原始林砍伐后形成迹地,土壤脲酶活性略有降低,人工云杉林地中,土壤脲酶以20年生云杉林地活性最大,其次为40年生云杉林地,其它林地都较低。林地土壤磷酸酶活性与土壤pH有关,川西亚高山针叶林土壤pH在中性至酸性之间,土壤磷酸酶活性以酸性磷酸酶为最高,中性磷酸酶次之,碱性磷酸酶活性最低。在人工云杉林地中,土壤酸性磷酸酶活性随云杉林龄的增加而降低,在60年生云杉林达最低值,可能与土壤中磷含量低有关,特别是速效磷。土壤蔗糖酶与土壤有机质、全N、速效N和全P呈显著相关,与土壤中真菌、放线菌数量呈极显著相关,说明蔗糖酶不仅能促进碳水化合物转化,而且与土壤中氮、磷状况有关,图8表明,人工云杉从幼林向成熟林演替阶段,土壤蔗糖酶活性急剧降低,40年生云杉林由于云杉自疏,微生物活性增加,蔗糖酶活性在此阶段陡然增加,C、N循环加快。

2.5 川西亚高山人工云杉林土壤肥力质量综合评价

根据土壤肥力质量指标与植物生长因子密切相关和对生态系统组成、物质和能量流动变化,以及管理措施有较强敏感性原则^[18~20],从土壤物理、化学和生物学性质角度,选取土壤肥力综合评价指标,运用多元分析(主成分分析)^[21,22],以各主成分特征贡献率为权重,加权计算各林地土壤肥力综合指标值(图9)。

从图9可以看出,土壤肥力指标值(Integrated fertility index IFI)出现负值,需说明的是,正负不表示实际意义,只表示相对大小,是评价指标数值标准化的结果。随着人工云杉林龄的增加,土壤IFI呈下降趋势,到40年生云杉林地达最低值,在人工云杉林出现自疏现象以后,土壤IFI稍有增加的趋势。这可能与植物群落生物循环和生物富集作用有关,如10年生云杉林、40年生云杉林和60年生云杉林的凋落物贮量分别为11.45、23.43和15.45 t/hm²,说明人工云杉林龄的增加,凋落物贮量先增后降,凋落物是产生量与分解量动态平衡的结果,40年生云杉林凋落物贮量最大,说明在此之前的一段时期,云杉凋落物产生量

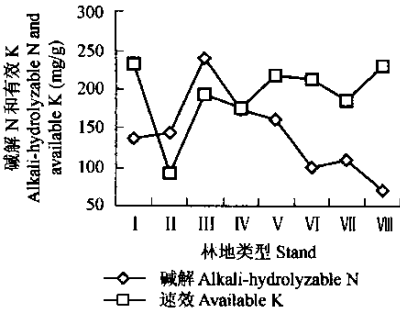


图4 土壤表层碱解N和有效K含量

Fig. 4 The alkali-hydrolyzable N and available K₂O in surface soil

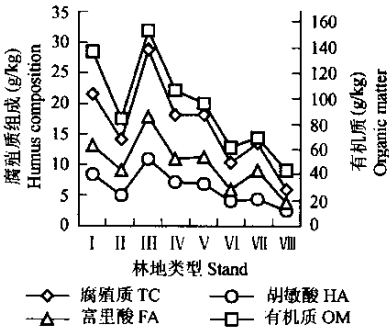


图5 土壤表层有机质及腐殖质组成

Fig. 5 Organic matter and humus composition in surface soil

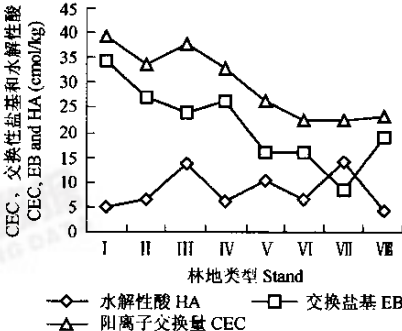


图6 土壤表层交换性能

Fig. 6 Exchangeable property in surface soil

大于分解量,土壤肥力处于耗损阶段,生物与土壤间物质和能量的交换能力减弱,表明云杉自肥能力低,故土壤肥力下降。

另外从图 9 可以看出,人工云杉不同演替阶段土壤 *IFI* 下降幅度不一样,从 10 年生云杉林(2.298)→20 年生云杉林(-0.306)→40 年生云杉林(-1.542),土壤肥力下降显著,这是因为在云杉幼林阶段,云杉生长速度快,原始林积累的养分被迅速消耗,再加上云杉幼林期(未郁闭之前)凋落量少,土壤肥力耗损大于归还所致。从 40 年生云杉(-1.542)→60 年生云杉(-0.913)及以后的演替阶段,可代表人工云杉出现自疏现象以后,土壤肥力恢复阶段,可以看出,此阶段土壤肥力恢复十分缓慢。主要与此阶段土壤酶活性和微生物数量低有关,特别是有利于针叶分解的真菌数量下降,导致凋落物分解进入土壤慢。可以推测,此阶段的人工针叶纯林通过物种竞争,会逐渐向针叶原始林演替,但会经过较长时间,从土壤肥力演替看,土壤肥力恢复为原始林(林型 I)状态也是十分缓慢的过程,说明针叶林自肥能力十分弱。

3 结论与讨论

川西亚高山云杉人工林不同演替阶段土壤肥力质量性状表现出不同的特点:

(1) 云杉人工林土壤有机质影响多种土壤性质,林地土壤肥力退化主要由于有机质的减少并导致相关土壤理化性质、微生物和酶活性恶化。人工云杉林土壤表层有机质含量随着抚育林龄的增加而降低,土壤中全 N、碱解 N、全 P、腐殖质、HA、FA、CEC、EB、微生物总数、细菌及真菌数量随有机质的减少而降低,土壤最大持水量、毛管持水量及总孔隙和毛管孔隙则先减少,在 40 年生云杉林达最低值,之后随着云杉自疏而有上升的趋势,各林地自然含水量与毛管持水量变化趋势一致,且变化曲线几乎平行,表明毛管持水量是决定林地自然含水量的主要因子。土壤 K 素和酶活性变化较复杂,钾素主要与土壤母质有关,酶活性主要与林地微生态环境有关。

(2) 林地土壤有机质主要来源于凋落物的分解,并受其分解速率的控制,解决当前人工成熟林地土壤退化的主要措施应为林地凋落物的分解创造条件,即因地制宜地对成熟人工林进行抚育间伐,改善林地微环境。在该区域造林应尽量避免营造针叶纯林,特别是密度过大的针叶纯林,建议把生物循环快的阔叶林与针叶林进行混交^[3]。

(3) 在人工云杉林地中,土壤 *IFI* 表现出非正“U”型的变化,即随着人工云杉林龄的增加,土壤 *IFI* 迅速下降,大约在云杉 40a 出现自疏之后,土壤 *IFI* 回升,但恢复速度十分缓慢。植被演替主要通过物种竞争来推动,土壤作为植被演替的重要环境条件,它不但促进前一种植被群落灭亡,而且为后续群落演替创造条件^[23]。土壤肥力是土壤的基本属性和质量特征,它对群落演替影响不容忽视。某一阶段土壤肥力状况,不仅反映了在此之前群落与土壤协调作用的结果,同时也决定了后续演替群落的土壤肥力基础和初始状态。川西亚高山地区,原始林采伐后形成迹地,如在采伐迹地上进行人工抚育,由于立地继承了原始林累积的大量凋落物,土壤肥力较高,云杉生长迅速,但由于人工种植前实施清林过程,灌木、草本被清除,林地生物归还能力极低,土壤肥力迅速下降,在云杉郁闭度达一定程度以后,种间竞争加强,林内光照弱,幼小个体退出竞争,林地凋落量增加,竞争自疏后,林地光照与土壤水肥条件得到一定程度改善,凋落物分解速率加快,但凋落物以针叶为主,分解归还仍十分缓慢,故此阶段土壤肥力虽得到一定程度恢复,但速度极慢。

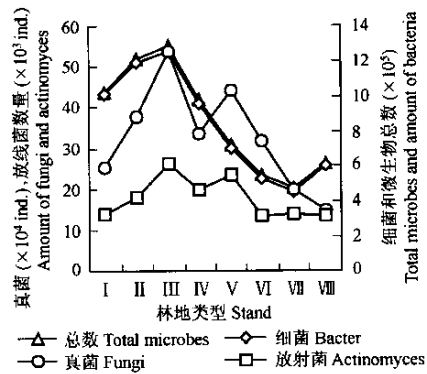


图 7 土壤表层微生物数量
Fig. 7 Microbes in surface soil

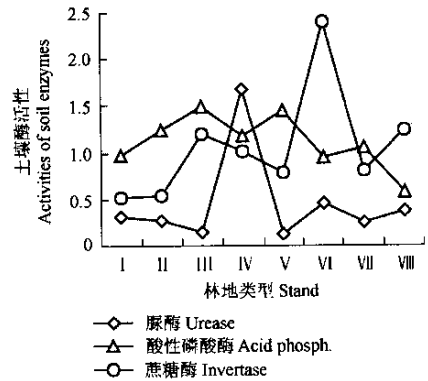


图 8 土壤表层脲酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶活性
Fig. 8 Urease(NH₄⁺), acid phosphatase(P₂O₅) and Invertase(G) in surface soil

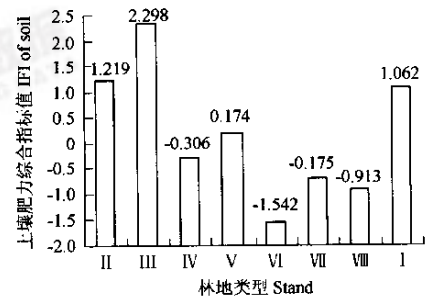


图 9 土壤综合肥力指标值
Fig. 9 Soil integrated fertility index

References:

- [1] Li C B. *Ecological study of Sichuan forest*. Chendu: Sichuan publishing house of science and technology, 1990.
- [2] Pan K W, Liu Z G. Structures & dynamics of the tree layer of artificial mixed forests in clear-cut areas of subalpine dark coniferous forests. *Chinese J. Application Environment Biology*, 1998, **4**(4): 327~334.
- [3] Pang X Y, Hu H, Qiao Y K, *et al.* Nutrient distribution and cycling of artificial and natural spruce forests in subalpine of western sichuan. *Chinese J. Application Environment Biology*, 2002, **8**(1): 1~7.
- [4] Wu Y, Liu Q, Qiao Y K, *et al.* Species diversity changes in subalpine coniferous forests of different restoration stages and their effects on soil properties. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(6): 641~647.
- [5] Hu H, Liu S Q, Chen Q H, *et al.* Changes of soil property in the course of subalpine coniferous forests artificial recovery in western Sichuan. *Chinese J. Application Environment Biology*, 2001, **7**(4): 308~314.
- [6] Jenny H. *The soil resource*. New York: Springer-Verlag, 1980.
- [7] Doran J W and Parkin T B. Defining and accessing soil quality. In: Doran J W, *et al.* eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA Special Publ. Number 35. Soil Science Society of American. Inc. and Am. Soc. of Agron. Inc., Madison, WI, 1994. 3~22.
- [8] Karlen D J, Mausbac M J, Doran J W, *et al.* Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society American J.*, 1997, **61**: 4~10.
- [9] Wu W D, Zhang T L, Gao C, *et al.* Changes of soil fertility quality properties under artificial Chinese fir forest in red soil region. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, **38**(3): 285~293.
- [10] Department of Microbiology, Nanjing Institute of Soil Science, CAS. ed. *Soil microbiological Methodology*. Beijing: Scientific Press, 1985.
- [11] Society of soil microbiology ed. *Soil microbiology methodology*. Beijing: Scientific Press, 1983.
- [12] Guan S Y. *Soil enzymes and its methodology*. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [13] Nanjing Institute of Soil Science, CAS. ed. *Physical and chemical analysis of soil*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978.
- [14] Seiichi O and Kyoichi K. Studies on the humus forms of forest soils II. The humus composition of fractionated horizons of higashiyama soil. *Soil Science and Plant Nutrient*, 1976, **22**(2): 149~158.
- [15] Zhang Q S, Yu X T. Seasonal Dynamics of soil microorganisms under various mixtures after chinese fir replanting in Fujian. *Acta Ecologica Sinica*, 1990, **10**(2): 121~126.
- [16] Hu C B, Zhu H G, Wei Y L, *et al.* Ecological distribution and biochemical activity of soil microorganisms in Qiping forest region of Cenxi county, Guangxi Province. *Chinese J. Ecology*, 1991, **10**(4): 4~8.
- [17] Hu C B, Zhu H G, Wei Y L. A study on microorganism and biochemical activity of chinese fir plantation on different ecological area in Guangxi. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1991, **15**(4): 303~311.
- [18] Pennock D J and Kessel C V. Clear-cut forest harvest impacts on soil quality indicators in the mixedwood forest of Sackatchewan, Canada. *Geodema*, 1997, **5**: 13~32.
- [19] Wang X J and Gong Z T. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China. *Geodema*, 1998, **81**: 339~355.
- [20] Ellert B H and Bettany J R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soil under contrasting management regimes. *Canada J. Soil Society*, 1995, **75**: 529~538.
- [21] Zhang Q F, Song Y K, You W H. Relationship between plant community secondary succession and soil fertility in Tiantong, Zhejiang Province. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(2): 174~178.
- [22] Liu C M, Li C Z, Shi M H, *et al.* Multivariate statistical analysis techniques applicated in differentiation of soil fertility. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, **16**(4): 444~447.
- [23] Odum E P. The strategy of ecosystem development. *Science*, 1969, **164**: 262~270.

参考文献:

- [1] 李承彪. 四川森林生态研究. 成都: 四川科技出版社, 1990.
- [2] 潘开文, 刘照光. 暗针叶林采伐迹地几种人工混交群落乔木层结构及动态. 应用与环境生物学报, 1998, **4**(4): 327~334.
- [3] 庞学勇, 胡泓, 乔永康, 等. 川西亚高山云杉人工林和天然林养分分布和生物循环比较. 应用与环境生物学报, 2002, **8**(1): 1~7.
- [4] 吴彦, 刘庆, 乔永康, 等. 亚高山针叶林不同恢复阶段群落物种多样性变化及其对土壤理化性质的影响. 植物生态学报, 2001, **25**(6): 641~647.
- [5] 胡泓, 刘世全, 陈庆恒, 等. 川西亚高山针叶林人工恢复过程的土壤性质变化. 应用与环境生物学报, 2001, **7**(4): 308~314.
- [9] 吴蔚东, 张桃林, 高超, 等. 红壤地区杉木人工林土壤肥力质量性状的演变. 土壤学报, 2001, **38**(3): 285~293.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所微生物室编著. 土壤微生物研究法. 北京: 科学出版社, 1985.
- [11] 土壤微生物研究会编. 土壤微生物实验法. 北京: 科学出版社, 1983.
- [12] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [13] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [15] 张其水, 俞新妥. 杉木连栽林地营造混交林后土壤微生物的季节性动态研究. 生态学报, 1990, **10**(2): 121~126.
- [16] 胡承彪, 朱宏光, 韦源连, 等. 广西岑溪县七坪林区土壤微生物生态分布及生化活性的研究. 生态学杂志, 1991, **10**(4): 4~8.
- [17] 胡承彪, 朱宏光, 韦源连. 不同生态地理区域杉木人工林土壤微生物及生化活性的研究. 植物生态学与地植物学报, 1991, **15**(4): 303~311.
- [21] 张庆费, 宋永昌, 由文辉, 等. 浙江天童植物群落次生演替与土壤肥力变化研究. 生态学报, 1999, **19**(2): 174~178.
- [22] 刘创民, 李昌新, 史敏华, 等. 多元统计分析在森林土壤肥力类型分辨中的应用. 生态学报, 1996, **16**(4): 444~447.