

去除地面枯落物对加勒比松 (*Pinus caribaea*) 林土壤特性的影响

陆耀东¹, 薛 立^{2,*}, 曹 鹤², 谢腾芳², 王相娥²

(1. 广东省佛山市林科所, 广东 佛山 528222; 2. 华南农业大学林学院, 广东 广州 510642)

摘要:通过去除地表凋落物(处理)和保留凋落物(对照)的样地比较,研究了加勒比松(*Pinus caribaea*)林的土壤特性对去除地表枯落物的响应,为了解人工干扰的加勒比松林土壤的退化机理提供依据。去除地表枯落物后的样地林木平均胸径和平均树高分别显著下降了 21% 和 8%。人为干扰造成了土壤质量的全面下降。与对照相比,去除地表枯落物的土壤容重增加了 14%,土壤毛管孔隙和总孔隙的比例分别减少了 13% 和 18%,非毛管孔隙也因为人为干扰而显著下降了 37%,土壤毛管持水量下降了 24%。去除地表枯落物没有对土壤 pH 造成影响,但是土壤有机质、全 N、全 P 和全 K 含量比对照分别减少了 42%、46%、16% 和 39%,水解 N、速效 P 和速效 K 含量分别比对照减少了 20%、15% 和 41%,土壤中 <0.01 mm 粘粒的比例下降了 27%。去除地表枯落物后的土壤细菌、真菌和放线菌数量分别下降了 50%、19% 和 13%,土壤脲酶、土壤磷酸酶和过氧化氢酶活性分别比对照下降了 35%、49% 和 49%。去除地表枯落物从林地以凋落物的形式直接取走大量养分,使林地有机质含量降低,导致土壤孔隙减少,保持水分功能减弱,养分状况的恶化,微生物数量减少和酶活性下降,最终引起林木生长下降。

关键词:加勒比松; 森林土壤; 物理性质; 养分; 微生物; 酶活性

文章编号:1000-0933(2008)07-3205-07 中图分类号:Q143,Q958.1 文献标识码:A

Impacts of litter removal on soil characteristics in a *Pinus caribaea* stand

LU Yao-Dong¹, XUE Li^{2,*}, CAO He², XIE Teng-Fang², WANG Xiang-E²

1 Foshan Institute of Forestry Science, Foshan 528000, China

2 College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3205 ~ 3211.

Abstract: The effects of human-impacted on soil properties in a *Pinus caribaea* stand were studied in an experiment comparing harvesting litter and control (no harvest) plots, in order to understand the mechanism of soil degradation in human litter removal *Pinus caribaea* stands and establish basis for sustainable forest management. Results showed that compared with those in undisturbed stand, the mean diameter at breast height (DBH) and mean tree height with litter removal significantly decreased by 21% and 8%, respectively. With litter removal, soil bulk density significantly increased by 14%, whereas capillary porosity, non-capillary porosity, total porosity and capillary water significantly increased by 12%, 37%, 18% and 24%, respectively. There was not significant difference in pH value between the disturbed stand and the undisturbed stand. However, litter removal significantly decreased the contents of soil organic matter, total N, total P, total K, alkalized N, available P, available K and clay by 42%, 46%, 16%, 39%, 20%, 15%, 41% and 27%,

基金项目:广东省林业局资助项目(4400-F07041,4400-F06051);佛山市科技资助项目(2005020061)

收稿日期:2008-02-18; **修订日期:**2008-04-07

作者简介:陆耀东(1969~),男,广西百色人,高级工程师,主要从事森林生态学和生态公益林研究. E-mail: 2247820@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: forxue@scau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by Foundation of Guangdong Forestry Bureau (No. 4400-F07041,4400-F06051), the Provincial Natural Science Foundation of Foshan City

Received date:2008-02-18; **Accepted date:**2008-04-07

Biography: LU Yao-Dong, Senior engineer, mainly engaged in forest ecology. E-mail: 2247820@163.com

respectively. The litter removal plot showed that the numbers of bacteria, fungi and actinomyces was 50%, 19% and 13% lower than the non-litter removal plot with a significant difference in bacterium number between the both. The litter removal significantly resulted in the decrease of the activities of urease, acid phosphatase and catalase. Decrease in litter amount by litter removal caused the decrease of organic matter in soil, which resulted in the decline of soil porosities and water holding capacity, and deterioration of nutrient status, the reduction of microorganism number and enzyme activity, as a result stand growth became slow.

Key Words: *Pinus caribaea*; forest soil; physical property; nutrient; microorganism; enzyme activity

加勒比松(*Pinus caribaea* Morelet)生长快、适应性强和耐瘠薄土壤,自然分布于中美洲及加勒比海诸岛,是世界热带地区栽植面积最广的针叶树种^[1]。我国于1961年从古巴引进加勒比松古巴变种后,在热带和南亚热带地区大量栽植^[2],总面积已超过10万 hm^2 ^[3],成为我国热带与南亚热带地区工业用材的主要树种之一。然而,加勒比松林多分布在人烟稠密的低山丘陵,人为活动频繁,长期受到收集枯枝落叶等人为活动的影响。收获林下调落物的活动改变森林土壤的理化性质^[4~6],并对土壤微生物产生影响^[7,8]。在森林生态系统的物质循环和能量流动等生态过程中,土壤微生物分解凋落物和释放养分^[9],土壤酶是最活跃的生物活性物质,越来越多的研究将二者与土壤养分一起进行评价,作为评价土壤质量的指标^[10~12]。尽管收获凋落物对森林生态系统影响的研究有一定的报道,人们对收获林下调落物对森林土壤结构与功能的响应及其机理的了解非常有限^[13~21]。开展在人为干扰和停止人为干扰下加勒比松林土壤结构和功能的研究,可以揭示人工林群落在人类干扰下的土壤退化过程及其机制,为加勒比松林的可持续管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样地概况

试验地位于广东省佛山市林科所,东经113°00',北纬23°06',属亚热带季风性气候型。年平均温度22℃,年降水量2383mm,集中在4~8月份。土壤为赤红壤,土层深厚,但是较紧实,有机质缺乏,呈强酸性。试验林为16年生加勒比松人工林,密度是204株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。该林分生长在5°的东坡上,面积约10 hm^2 。林分的结构简单,乔木仅一层且林冠稀疏,郁闭度为0.6。林下层植物稀少,以海金沙(*Lygodium japonicum* (Thunb.) Sw)、扇叶铁线蕨(*Adiantum flabellulatum* Linn)、金银花(*Lonicera japonica* Thunb)为主。两块样地的坡度、坡向、土壤、林分密度一致,在设置前没有收集凋落物的干扰。

1.2 实验设计

在林分中部设置样地面积30m×30m的1对样地。这对样地由处理(收获凋落物样地)和对照(不进行收获凋落物活动的样地)组成。自2001年4月开始,当地居民根据他们的习惯继续在处理样地进行收获凋落物活动(每月1次),在对照样地则禁止任何人为活动。

1.3 样品采集和处理

试验开始后,当地居民对处理样地进行收获活动时,将林下调落物称重,并采亚样品带回实验室测量其干重。2006年4月在处理和对应对样方中,测定每木的胸径和高度。用容积为100 cm^3 的环刀在土层20cm处采取自然状态土样,重复3次,带回实验室测土壤容重和进行其他土壤物理性质的分析。用五点混合采样法在样地取0~40cm处的土样(3个重复),带回实验室经室内风干后分析。将水土以2.5:1混合后用pH计测土壤pH;有机质用重铬酸钾容量法测定;全氮用半微量凯氏法测定;用氢氧化钠碱熔法将土壤样品熔融后提取待测液,用钼蓝比色法测全磷,火焰光度计测全钾;碱解氮用碱解扩散法测定;用0.5 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的碳酸氢钠提取土壤样品后,用钼蓝比色法测速效磷;用1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的中性醋酸钠提取土壤样品后,用火焰光度计测速效钾^[22],粘粒含量用比重计法测定。

土壤微生物计数用稀释平板法测定^[23]。脲酶用扩散法,酸性磷酸酶用磷酸苯二钠比色法,缓冲液的pH

为 5.0。过氧化氢酶用高锰酸钾滴定法^[24]。

每个样品做 3 次重复测定,结果取重复测定的算数平均值。对处理和对照的数据平均值进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 林分生长

去除地表枯落物后的样地林木平均胸径和平均树高分别为 25.5 cm 和 13.2 m,而对照样地分别为 32.4 cm 和 14.4 m,处理的平均胸径极显著下降了 21% ($P < 0.01$),平均树高显著下降了 8% ($P < 0.05$),说明平均胸径对去除地表枯落物的影响比平均树高敏感(图 1A,B)。

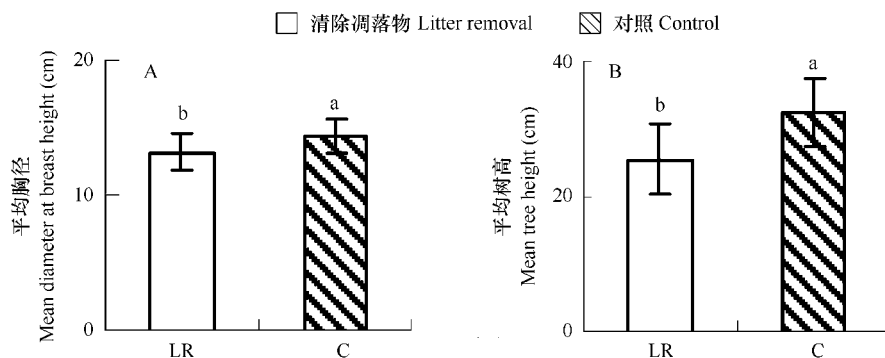


图 1 林分生长

Fig. 1 Stand growth

2.2 土壤物理性质

土壤容重可以反映土壤紧实度,也是土壤质量的一个重要指标。它与土壤的孔隙度密切相关。在处理的土壤容重极显著大于对照的土壤容重($P < 0.01$),比后者增加了 14%(图 2A)。说明去除地表枯落物使土壤变得紧实,造成土壤退化^[25,26]。

土壤孔隙度是评价土壤结构特征的重要指标之一。去除地表枯落物后的林地土壤毛细孔隙和总孔隙的比例分别比对照减少了 13% 和 18%,达到极显著水平($P < 0.01$),非毛细孔隙也因为去除地表枯落物而显著下降了 37% ($P < 0.05$)(图 2B ~ D),说明表层土壤非毛细孔隙对去除地表枯落物更为敏感,这与张希彪等^[19]的研究结果一致。去除地表枯落物造成孔隙减少,恶化了土壤结构。

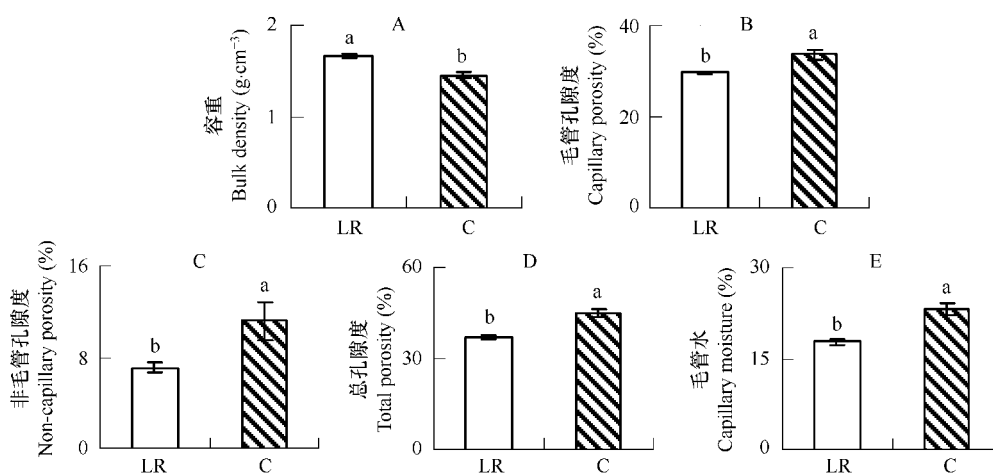


图 2 土壤物理性质

Fig. 2 Soil physical properties

土壤水分能反映土壤的涵养水源能力。去除地表枯落物后的土壤毛管持水量极显著下降($P < 0.01$), 为对照的 76% (图 2E)。去除地表枯落物破坏了土壤结构, 使土壤孔隙减少, 储水能力下降。另外, 凋落物层具有保持土壤水分的功能, 去除地表枯落物样地的凋落物层消失, 加速了水分的蒸发。

2.3 土壤化学性质

去除地表枯落物后的土壤和对照均呈强酸性, 二者无显著差异 (图 3A)。去除地表枯落物后的土壤有机质显著下降($P < 0.01$), 幅度达 42% (图 3B)。土壤有机质是土壤固相中最复杂的系统, 含有植物生长所需要的各种营养元素, 在有机质的缓慢分解中逐渐释放出来供植物吸收利用, 在去除地表枯落物的土壤全 N、全 P 和全 K 含量比对照分别减少了 46%、16% 和 39%, 均达到极显著水平($P < 0.01$) (图 3C ~ E)。林地养分主要来源于凋落物回归, 去除地表枯落物中断了凋落物回归的途径, 使土壤变得贫瘠。

去除地表枯落物后的林地土壤水解 N 和速效 K 含量分别比对照减少了 20% 和 41%, 达到极显著水平($P < 0.01$), 速效 P 也显著下降(15%) ($P < 0.05$) (图 3F ~ H), 说明去除地表枯落物对土壤速效 K 影响最大。去除地表枯落物后的土壤中 < 0.01 mm 粘粒的比例显著小于对照($P < 0.01$), 比后者下降了 27% (图 3I)。

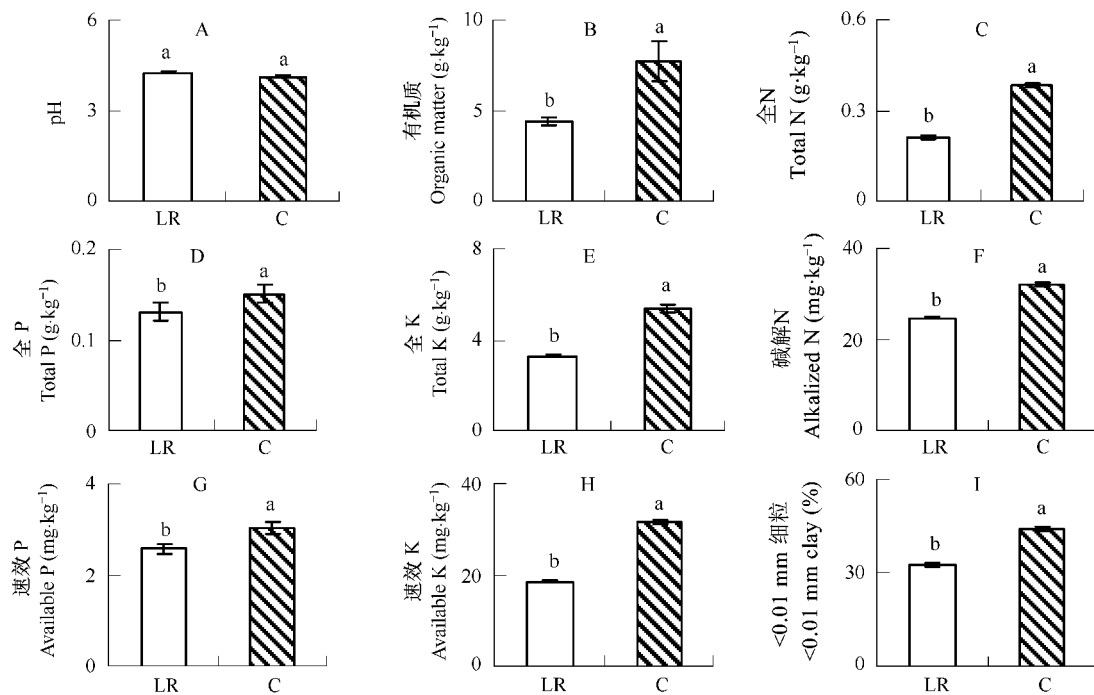


图 3 土壤化学性质

Fig. 3 Soil chemical properties

2.4 土壤微生物和酶活性

土壤微生物将有机质分解, 释放养分供植物利用, 形成养分的循环, 还产生大量生物活性物质, 直接影响土壤的特性。土壤微生物所需的营养物质大部分直接或间接来自有机质。去除地表枯落物后的土壤细菌、真菌和放线菌数量分别占其微生物总量的 91%、2% 和 7%, 而对照分别为 95%、1% 和 4% (图 4A)。去除地表枯落物后的土壤细菌数量下降了 50%, 达到极显著水平($P < 0.01$), 真菌和放线菌数量分别下降 19% 和 13% (图 4B, C), 说明细菌对去除地表枯落物最敏感。

植物根系及其残体、土壤动物及其遗骸和微生物所分泌的酶, 参与土壤中一切复杂的生物化学过程, 包括凋落物的分解、腐殖质及各种有机化合物的分解与合成, 土壤养分的固定与释放, 在土壤有机质积累和养分循环中起重要作用。去除地表枯落物后的脲酶、土壤磷酸酶和过氧化氢酶活性分别比对照下降了 35%、49% 和

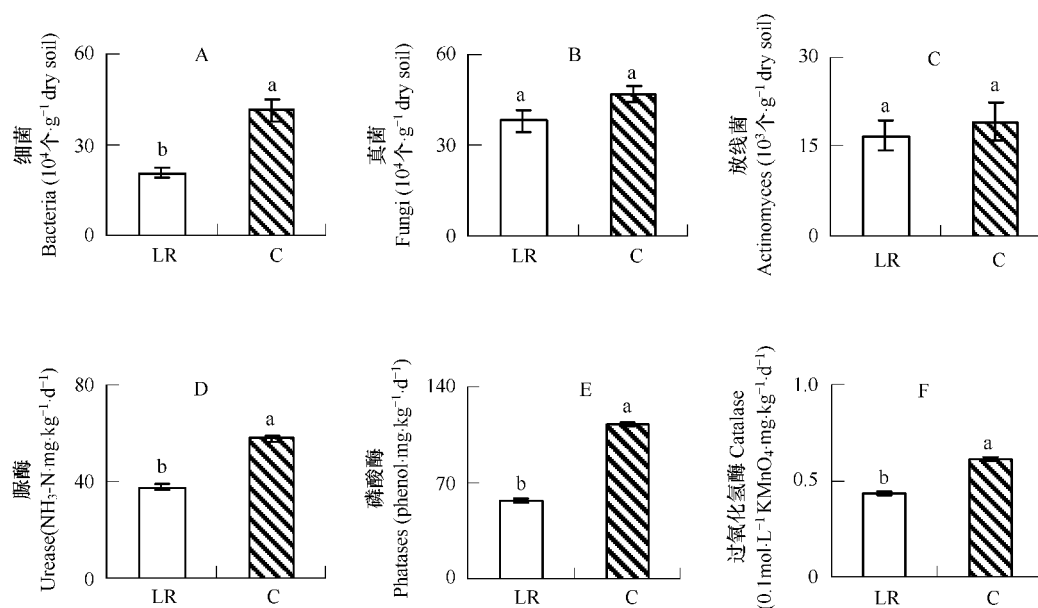


图4 土壤微生物和酶活性

Fig. 4 Soil microorganism and enzyme activities

49%, 达到极显著水平 ($P < 0.01$) (图 4D ~ F)。脲酶的减少不利于有机分子中肽键的水解, 影响了土壤中氮的释放。南方红壤缺磷严重, 土壤磷酸酶活性的下降会进一步减少土壤磷的有效性。过氧化氢酶活性的下降将阻碍土壤腐殖质合成和土壤有机质的积累, 不利于分解土壤代谢过程中的有毒物质。

3 讨论

本研究表明, 去除地表枯落物造成了土壤质量的全面下降。去除地表枯落物活动不但清除了林分内地面的凋落物层, 而且通过干扰活动中的人为踩踏压实了土壤, 影响了土壤的颗粒组成和土壤孔隙的数量、土壤持水性能, 导致林地土壤发生退化。土壤颗粒是构成土壤结构的主要组分。清除地表凋落物后, 降雨过程中, 雨滴直接打击裸露的地面, 细小土粒堵塞孔隙, 容重增加, 使水分下渗受阻, 地表径流增加, 土壤中的细土随水流走, 故出现土壤中细粒减少^[27,28]。同时由于地表枯落物的清除, 土壤有机质减少, 构成团聚体的能力下降, 导致土壤颗粒缺乏有机质的胶结, 土壤的抗水蚀能力减弱, 可移动的小颗粒增多^[15]。

土壤孔隙状况受土壤质地和结构的控制。清除地表枯落物而产生的土壤矿质颗粒和有机质的减少影响了团聚体的形成, 导致了土壤毛管孔隙和非毛管孔隙的减少, 恶化了土壤的透气性和透水性。土壤有机质疏松多孔, 吸水能力可达自身重量的几十倍, 因此对保持土壤水分有积极作用。土壤有机质和毛管孔隙的减少造成了土壤持水能力减弱和容重增加。

森林生态系统中, 枯落物对于提高土壤肥力有重要的作用, 是森林土壤有机质、速效氮和磷的主要补给者^[30]。土壤有机质含有各种动植物残体、微生物及各种有机产物, 能促进植物和微生物的生理活性, 是森林生长所需养分的来源。土壤有机质能改善土壤的胶体状况, 使土壤的吸附作用增强, 而土壤细粒而包含较多养分。去除地表枯落物从林地取走枯落物中的养分, 显著减轻了土壤轻腐殖质量^[29], 造成土壤细粒的流失^[19], 这是导致其土壤养分含量下降的重要原因。K 容易受到雨水的淋溶。在雨季, 没有地表枯落物保护的样地可能会产生强烈的钾淋溶^[30], 使土壤速效 K 下降的比土壤水解 N 和速效 P 快。

去除枯落物使地表暴露于光照之下和直接受雨淋, 可以引起地表温度和土壤湿度的剧烈波动^[21,29], 恶化了微生物的生存环境。一般认为, 细菌喜欢湿润, 真菌耐干, 不能耐受低氧水平; 放线菌具有喜热耐旱的特性, 生长慢, 只有当土壤中各类微生物竞争的压力减少时才出现^[31]。去除地表枯落物样地的细菌数量少与其有机质和养分含量低, 土壤毛管持水量和自然含水量下降有关, 而有机质和养分含量低和土壤非毛管孔隙少导

致其真菌数量下降。放线菌的情况较为复杂。一方面,干扰样地的有机质和养分含量低造成其绝对数量小于对照样地。另一方面,由于枯落物层的破坏,土壤变得干燥和氧气含量低,减轻了其与细菌和真菌竞争的压力,有利于耐旱的放线菌繁殖,所以放线菌在微生物总数中所占比例增加。去除地表枯落物不利于土壤微生物生长繁殖,使土壤中三大菌的数量下降,而对照样地的林下枯落物层增加了土壤孔隙、含水量和养分,为微生物的生存提供了良好的环境。

森林土壤酶系统是森林土壤中生物活动的产物,与土壤微生物一起推动土壤的代谢过程,与森林土壤有机质含量和微生物数量密切相关。去除地表枯落物造成的土壤有机质、氮、磷含量和微生物数量的减少,造成了脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性下降,表明其有机 N 的分解迟缓,供 P 能力下降,碳素循环减弱和土壤腐殖质合成能力下降,造成地力的衰退。

枯落物的减少使土壤变得贫瘠^[16],树木对可利用氮的吸收和固定减少^[14]及叶片的氮含量下降^[19],导致林分生产力的下降^[16]。去除地表枯落物引起加勒比松人工林土壤退化和生长下降的机理是人为从林地以枯落物的形式直接取走大量养分,使林地有机质降低,导致土壤孔隙减少,保持水分功能减弱,养分状况恶化,微生物数量减少和酶活性下降,最终引起林木生长下降。因此停止收集地面枯落物活动,有利于维持加勒比松人工林的土壤肥力和促进其生长。

References:

- [1] Nikes D G. Genetic improvement of low land tropical conifers. FAO. Rome, 1979.
- [2] Wang H, Malcolm D C, Fletcher A M. *Pinus caribaea* in China: introduction, genetic resources and future prospects. For Ecol Manage, 1999, 171: 1—15.
- [3] Zheng Y Q, Wang H R. Genetic resources and breeding of *Pinus caribaea* in China, In: Forests and Society: the Role of Research, Abstracts of group discussions vol. 2. XXI IUFRO World Congress 2000, Kuala Lumpur, 2000. 46.
- [4] Busse M D, Cochran P H, Barret J W. Changes in ponderosa pine site productivity following removal of understory vegetation. Soil Sci Soc Am J, 1996, 60, 1614—1621.
- [5] Huang J, Lacey S T, Ryan P J. Impacts of forest harvesting on the hydraulic properties of surface soils. Soil Sci, 1996, 161: 79—86.
- [6] Jurgensen M F, Harvey A E, Graham R T, et al. Impacts of timber harvesting on soil organic matter, nitrogen, productivity, and health of inland northwest forests. For Sci, 1997, 43: 234—251.
- [7] Battigelli J P, Spence J R, Langor D W, et al. Short-term impact of forest soil compaction and organic matter removal on soil mesofauna density and oribatid mite diversity. Can J For Res, 2004, 34: 1136—1149.
- [8] Berch S M, Battigelli J P, Hope G D. Responses of soil mesofauna communities and oribatid mite species to site preparation treatments in high-elevation cutblocks in southern British Columbia. Pedobiologia, 2007, 51(1): 23—32.
- [9] Dick R P. Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health. In: Pankhurst, C. E., Doube, B. M., Gupta, V. V. S. R. eds. Biological Indicators of Soil Health. CAB International, Wallingford, 1997. 21—156.
- [10] Deng S P, Tabatai M A. Effect of tillage and residue management on enzyme activities in soils. III. Phosphatases and arysulphatases. Biol Fertil Soils, 1997, 24: 141—146.
- [11] Bandick A K, Dick R P. Field management effects on soil enzyme activities. Soil Biol Biochem, 1999, 31: 1471—1479.
- [12] Chapman S J, Campbell C D, Puri G. Native woodland expansion: soil chemical and microbiological indicators of change. Soil Biol Biochem, 2003, 35: 753—764.
- [13] Mo J, Brown S, Peng S, Kong G. Nitrogen availability in disturbed, rehabilitated and mature forests of tropical China. For Ecol Manage, 2003, 175: 573—583.
- [14] Zhang G, Jiang H, Niu G, et al. Simulating the dynamics of carbon and nitrogen in litter-removed pine forest. Ecol Model, 2006, 195: 363—376.
- [15] Zhang X B, Shanguan Z P. Effect of Human-induced disturbance on physical properties of soil in artificial *Pinus tabulaeformis* Carr. forests of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3685—3695.
- [16] Xue L. Nutrient cycling in a Chinese-fir (*Cunninghamia lanceolata*) stand on a poor site in Yishan, Guangxi. For Ecol Manage, 1996, 89: 115—123.
- [17] Murata T, Nagaishi N, Hamada R, et al. Relationship between soil neutral sugar composition and the amount of labile soil organic matter in Andisol treated with bark compost or leaf litter. Biol Fertil Soils, 1998, 27: 342—348.
- [18] Xue L, Li Y, Qu M, et al. Studies on water conservation and Soil Characteristics in Stands of *Michelia macclurei*, *Schima superba* and *Castanopsis fissa*. Chin J Appl Ecol, 2005, 16(9): 1623—1627.

- [19] Tan X, Scott X, Chang S X, *et al.* Effects of soil compaction and forest floor removal on soil microbial properties and N transformations in a boreal forest long-term soil productivity study. *For Ecol Manage*, 2005, 217 (2005):158—170.
- [20] Negrete-Yankelevich S, Fragoso C, Newton A C, *et al.* Successional changes in soil, litter and macroinvertebrate parameters following selective logging in a Mexican Cloud Forest. *Appl Soil Ecol*, 2007, 35: 340—355.
- [21] Matsushima M, Chang S X. Effects of understory removal, N fertilization, and litter layer removal on soil N cycling in a 13-year-old white spruce plantation infested with Canada bluejoint grass. *Plant Soil*, 2007, 292: 243—258.
- [22] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences eds. *The Physical and Chemical Analysis of Soil*. Shanghai: Shanghai Sciences and Technology Press, 1978.
- [23] Microorganism Laboratory, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences ed. *Research Methods of Soil Microorganism*. Beijing: Science Press, 1985.
- [24] Guan S Y. *Soil Enzyme and Research Methods*. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [25] Hernandez T, Garcia C, Reinhardt I. Short-term effect of wildfire on the chemical, biochemical and microbiological properties of *Mediterranean pine* forest soil. *Biol Fertil Soils*, 1997, 25:109—116.
- [26] Lowery B, Swan J. Physical properties of selected soils by erosion class. *Soil Water Conserve*, 1995, 50:306—311.
- [27] Zha X, Huang S Y. Effects of vegetation destruction on accelerated erosion and soil degradation processes on the Loess Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(2):109—114.
- [28] Zheng F L, Tang K L, Zhang K L, *et al.* Relationship of eco-environmental change and natural erosion and man-made accelerated erosion. *Acta Phytocologica Sinica*, 1995, 15 (3): 251—259.
- [29] Mo J M, Brown S, Peng S L, *et al.* Effects of human impacts on fine roots and soil organic matter of a pine forest in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (3): 491—499.
- [30] Xiong Y M, Xia H P, Li Z A, *et al.* Impacts of litter and understory removal on soil properties in a subtropical *Acacia mangium* plantation in China. *Plant Soil*, 2008, 304(1-2): 179—188.
- [31] Zhang P, Guo H J, Yang S X, *et al.* Ecological distribution and biochemical properties of soil microorganisms in Gaoligong Mountains. *Chin J Appl Ecol*, 1999,10 (1):74—78.

参考文献:

- [15] 张希彪,上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响. *生态学报*,2006,26(11):3685~3695.
- [18] 薛立,李燕,屈明,等. 火力楠、荷木和黎蒴林的土壤特性及水源涵养的研究. *应用生态学报*, 2005, 16(9):1623~1627
- [22] 中国科学院南京土壤研究所编. *土壤理化分析*. 上海:上海科学技术出版社, 1978.
- [23] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. *土壤微生物研究法*. 北京:科学出版社, 1985.
- [24] 关松荫. *土壤酶及其研究法*. 北京: 农业出版社, 1986.
- [27] 查轩,黄少燕. 植被破坏对黄土高原加速侵蚀及土壤退化过程的影响. *山地学报*,2001,19(2):109~114.
- [28] 郑粉莉,唐克丽,张科利,等. 自然侵蚀和人为加速侵蚀与生态环境演变. *生态学报*,1995,15(3):251~259.
- [31] 张萍,郭辉军,杨世雄,等. 高黎贡山土壤微生物生态分布及其生化特性的研究. *应用生态学报*,1999,10 (1): 74~78.