

## 木麻黄连栽林地根际土壤化学性质与酶活性动态\*

叶功富<sup>1,3</sup> 侯杰<sup>2</sup> 张立华<sup>1</sup> 卢昌义<sup>3</sup> 陈胜<sup>4</sup> 黄荣钦<sup>4</sup>(1. 福建省林业科学研究院 福州 350012 2. 闽江学院数学系 福州 350002  
3. 厦门大学海洋与环境学院 厦门 361005 4. 福建省东山赤山林场 东山 363400)

**摘要** 在福建省东山县滨海沙地,对连栽条件下木麻黄林地根际和非根际土壤化学性质和酶活性进行了对比研究。结果表明:二代木麻黄林的根际和非根际土壤 pH 值均小于一代林,表明木麻黄连栽引起根际土壤酸化;根际土壤有机质、CEC 值、水解性总酸度、全氮、水解氮、速效钾、交换性  $Mg^{2+}$  和  $Ca^{2+}$  含量随着木麻黄连栽而降低,且心土层(20~40cm)差异更大,但土壤全磷、全钾变化不大;与一代林相比,二代木麻黄根际土壤磷酸酶和过氧化物酶活性减弱,多酚氧化酶活性增大,脲酶无明显变化。第二代木麻黄林地根际土壤养分的消耗、生物活性的降低和有毒物质的累积等,可能造成土壤肥力衰退,林木生长受阻。

**关键词** 木麻黄;连栽;根际;土壤化学性质;酶活性

[中图分类号]S714.2 [文献标识码]A [文章编号]1002-2651(2012)02-0001-04

## Rhizosphere Soil Chemical Properties and Enzyme Activities of Multi-rotation *Casuarina Equisetifolia* Plantation

Ye Gongfu<sup>1,3</sup>, Houjie<sup>2</sup>, Zhang Lihua<sup>2</sup>, Lu Changyi<sup>3</sup>, Chen Sheng<sup>4</sup>, Huang Rongqin<sup>4</sup>

(1Fujian Academy of Forestry, Fuzhou 350012, China; 2Mathematics Department of Minjiang College, Fuzhou 350108, China; 3. College of Oceanography and Environmental Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 4Chishan Forestry Farm of Dongshan County, Fujian Province, 363400, China)

**Abstract** The comparative trial was conducted to study the chemical properties and enzyme activities of the rhizosphere and non-rhizosphere soil supporting the first and second generation *Casuarina equisetifolia* plantation on coastal sand at Dongshan County of Fujian Province. The results showed that the pH value in rhizosphere and non-rhizosphere soil in the second generation plantation was lower than the first generation plantation, indicating that the multi-rotation plantation increased the acidity of rhizosphere soil. The contents of organic matter, CEC, Hydrolytic acidity, total N, Hydrolytic N, available K, exchange  $Mg^{2+}$  and  $Ca^{2+}$  in rhizosphere soil of second generation plantation was also lower than that of the first generation, and the difference in 20~40cm depth of soil was obvious, but there was no significant difference for total P and total K. Compared with the first generation, the activities of phosphatase and peroxidase in rhizosphere soil of second generation were decreased, while the activities of polyphenol oxidase were increased, but there was no obvious change on activity of urease. The soil fertility would decline and forest growth decrease in multi-rotation *Casuarina equisetifolia* plantation, due to the soil nutrient consumption, biochemical activity

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(41176092); 国家“十一五”科技支撑计划(2009BADB2B0302); 国家林业局南方山地用材林培育重点实验室、福建省森林培育与林产品加工利用重点实验室资助项目

收稿日期: 2012-3-15 修回日期: 2012-4-10

作者简介: 叶功富(1966-), 男, 福建省政和县人, 博士, 教授级高工, 厦门大学兼职教授, 从事海岸防护林生态管理研究。

reduction and toxic substance accumulation.

**Key words** *Casuarina equisetifolia*, multi-rotation plantation, rhizosphere, soil chemical property, enzyme activity

木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)作为东南沿海防护林的主要树种,在防风固沙、盐碱地改良等方面具有无可替代的显著作用<sup>[1]</sup>。由于20世纪80、90年代多数木麻黄防护林已进入更新阶段,二代更新林分的生长及其对土壤肥力的影响,成为生产上十分关注的问题<sup>[2]</sup>。有关木麻黄不同年龄阶段及木麻黄连栽林地土壤肥力的变化已有相关研究<sup>[3~5]</sup>,但未见从根际微区角度对连栽条件下木麻黄林地根际土壤环境效应的报道。林木根际是土壤-根系-微生物三者相互作用的场所,也是各种养分、水分及各种物质进入根系参与循环和能量转化的重要场所之一,因此对根际养分进行研究是十分必要的<sup>[6]</sup>。本文选择福建省东山县滨海沙地,对第一、二代木麻黄防护林的根际土壤进行了测定,以探讨木麻黄连栽引起根际微域土壤性质的变化及其对林木生长的影响,为木麻黄防护林的可持续经营提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验样地在福建省东山县赤山林场,位于福建省南部,东经118°18',北纬23°40',属亚热带海洋性季风气候,年平均温度20.8℃,年均降水1164mm,多集中在台风多发的5~9月,自然灾害多是台风和干旱。土壤以沙地为主,肥力很差。整个生态系统以木麻黄为主,林下植被稀少,常见的零星植被有木豆(*Cajanus cajan*),鼠刺(*Spinifex littores*)和牡荆(*Verbena negando*)。选择相同立地条件下,年龄均为23年生的第一、二代木麻黄防护林,分别设置面积为20m×20m的样地,进行每木调查,选取平均木。不同代数木麻黄林样地概况见表1。

表1 不同代数木麻黄林的样地概况

林分类型	林龄 (a)	平均胸径 (cm)	平均树高 (m)	平均冠幅 (m×m)
一代林	23	22.05	18.28	4.63×4.28
二代林	23	19.20	16.88	4.18×3.95

### 1.2 研究方法

1.2.1 土壤取样方法 取样采用掘根抖落法:用取土器在平均木周围取出长大约50cm(直径8cm)的土柱,分表土(0~20cm)和心土(20~40cm)两层,小心地取出各层土柱内的细根,轻轻抖落附在根上的3mm以内的土壤即为根际土壤(以R表示),取相应土层

的土壤为非根际土壤(以S表示)。分别采集多株平均木根际和非根际土壤混合样品,带回实验室风干,去除有机碎片,过2mm筛备用。

1.2.2 土壤测定方法 土壤pH值、交换性能及养分分析均采用常规分析方法<sup>[7]</sup>。土壤酶活性严格参照《土壤酶及其研究法》<sup>[8]</sup>进行,其中脲酶用比色法、磷酸酶用磷酸苯二钠比色法、过氧化物酶容量法、多酚氧化酶用碘量滴定法测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 木麻黄连栽林地的根际土壤pH值及交换性能

分析结果(表2)表明,第一、二代木麻黄根际土壤pH均低于全土,且根际土的pH与全土的差值大小,表土层:二代(0.05)<一代(0.12);心土层:二代(0.07)<一代(0.13),表明木麻黄根际土壤环境偏酸性。二代木麻黄林根际土pH值要小于一代林,这与不同代数的杉木林根际pH的变化情况相近<sup>[9]</sup>,表明木麻黄连栽引起根际土壤酸化,这主要是根土阴阳离子吸收不平衡所致,直接影响根际土壤养分的有效性。

不同代数木麻黄林的根际土壤有机质含量均大于非根际土壤,二代林根际有机质含量明显小于一代林。二代木麻黄林根际有机质含量与非根际含量的差值分别为0.769(表土层)和0.256(心土层),依次小于一代林0.967(表土层)和0.737(心土层)。原因可能是与一代林相比,二代木麻黄生长过程中根系分泌质子、离子和有机物质的能力减弱。

土壤阳离子交换量的大小与土壤可能吸附的速效养分的容量及土壤保肥能力有关,交换量大的土壤就能吸附较多的速效养分,以免它们在短期内流失。表2分析结果表明:二代木麻黄林根际土壤CEC值是一代林的84.97%(表土层)和59.88%(心土层),二代木麻黄非根际土壤CEC值是相应一代林的93.44%(表土层)和50.08%(心土层),木麻黄连栽可能使得土壤保肥供肥能力下降,土壤缓冲性能减弱。水解性总酸度无论在表土层或心土层,二代木麻黄林均高于一代林,这种变化与pH值动态相一致。

### 2.2 木麻黄连栽林地的根际土壤养分状况

土壤养分是林木生长发育所必需的物质基础,同时也是土壤因子中易于被控制和调节的因子。林木在生长过程中不断地从土壤中摄取养分,同时又通过

分泌等途径改变根际环境, 从而对根际土壤养分产生重大影响。

表 2 第 1、2 代木麻黄林根际土壤 pH 值、有机质及阳离子交换量

林分	土壤深度 (cm)	区域	pH 值	有机质 (g/kg)	CEC (cmol(+) /kg 土)	水解性总酸度 (cmol(+) /kg)
一代林	表土层 (0~20)	根际 R	5.34	2.827	2.336	1.21
		非根际 S	5.46	1.860	1.889	0.93
	心土层 (20~40)	根际 R	5.38	2.261	1.812	0.95
		非根际 S	5.51	1.524	1.965	0.76
二代林	表土层 (0~20)	根际 R	5.29	2.606	1.985	1.25
		非根际 S	5.34	1.837	1.765	0.99
	心土层 (20~40)	根际 R	5.36	1.046	1.085	1.06
		非根际 S	5.43	0.790	0.984	0.89

表 3 分析结果显示: 无论根际还是非根际土, 木麻黄二代林的全氮和水解氮含量均小于一代林。根际水解氮含量在一、二代林心土层间的差异值(2.06, 2.42) 大于对应表土层(0.34, 0.99) 非根际间的差异值(0.99, 2.37) 大于对应的根际土(0.34, 2.06)。一方面, 木麻黄是固氮树种, 能固定空气中的氮以供其生长所需; 另一方面, 木麻黄大部分根系在土壤表层盘结, 减弱了表土层根际与非根际土壤之间差异的显著水平。

土壤全磷、全钾含量在不同代数木麻黄根际和非

根际中差异较小。无论是根际还是非根际, 二代林中有有效磷、速效钾含量均小于相应的一代木麻黄, 而且表土层的差异更为显著, 如二代林心土层根际有效磷比一代林减少 8.33%, 表土层则降低 18.75%, 表明根际有效磷、速效钾均发生亏缺。根际环境中引起磷素变化的因素是很复杂的, 主要受根际 pH 值、林木根的吸收力、根分泌物及微生物的影响。以往对农作物的研究认为, 有效磷、钾在植物根际会出现亏缺, 但在林木上的研究结果既有亏缺<sup>[10]</sup> 又有富集<sup>[11]</sup>。

表 3 第一、二代木麻黄林根际土壤养分含量

林分	土壤深度 (cm)	区域	全氮 (g/kg)	水解氮 (mg/kg)	全磷 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	全钾 (g/kg)	速效钾 (mg/kg)	Mg <sup>2+</sup> (cmol(Mg <sup>2+</sup> ) /kg)	Ca <sup>2+</sup> (cmol(Ca <sup>2+</sup> ) /kg)
一代	表土层	根际 R	0.223	8.88	0.014	0.32	12.41	30.27	0.228	0.626
		非根际 S	0.159	7.91	0.012	0.27	11.66	20.14	0.186	0.518
	心土层	根际 R	0.185	4.21	0.013	0.24	12.19	22.35	0.326	0.474
		非根际 S	0.156	4.52	0.012	0.21	11.48	18.12	0.197	0.502
二代	表土层	根际 R	0.181	8.54	0.013	0.26	12.16	20.06	0.088	0.446
		非根际 S	0.154	6.92	0.011	0.20	11.40	15.08	0.067	0.460
	心土层	根际 R	0.133	2.15	0.012	0.22	11.84	17.35	0.150	0.329
		非根际 S	0.116	2.10	0.011	0.17	11.57	13.08	0.119	0.418

由表 3 还可见, 一、二代木麻黄林根际土壤 Mg<sup>2+</sup> 均高于非根际土壤, Ca<sup>2+</sup> 在根际与非根际土间的变化没有明显的规律性。木麻黄二代林中 Mg<sup>2+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 含量小于一代林, 这可能与木麻黄在生长过程中对钙镁养分的大量消耗, 二代林地没有及时得到补给有关。

### 2.3 木麻黄连栽林地根际土壤酶活性

土壤酶活性不仅与土壤的自身性质有关, 也与林木种类和经营方式等密切相关, 连栽不仅能引起各种土壤性状的改变, 而且也会引起土壤酶活性的变化<sup>[12]</sup>。表 4 分析结果表明, 一代木麻黄林根际土壤性磷酸酶活性分别是二代的 1.53 倍(表土层)和 3.70

倍(心土层), 一代的土壤磷酸酶 R/S 值无论在表土层还是心土层(1.96, 2.18) 均大于相应的二代林(1.57, 1.72)。这说明了二代木麻黄根际土壤磷酸酶活性急剧下降, 根际效应值明显减少, 原因可能是连栽后林木根际微生物活动减弱, 分泌物数量减少, 质量下降。磷酸酶活性的减弱导致二代木麻黄林中土壤有机磷矿化速率的降低。

过氧化物酶在土壤腐殖质的形成过程中具有重要的作用, 参与腐殖质的合成, 能促进土壤有机质氧化成醌。二代木麻黄林根际土壤过氧化物酶活性低于一代林, 表土层和心土层分别下降 8.12% 和

5.96% 过氧化物酶活性的减弱不利于沿海沙地的改良。

脲酶是对土壤中尿素进行催化水解的一种比较专性的酶。一、二代木麻黄根际土壤脲酶活性变化不大,二代林表土层脲酶活性略高。木麻黄为固氮树种,具有比较活跃的固氮性能和氮素营养循环能力,能在有机质和含氮量低的沙地生长良好,这对土壤脲酶活性的维持可能有一定的作用。

无论根际还是非根际,二代木麻黄土壤多酚氧化酶活性均高于一代林,根际表土层和心土层分别增加 5.85% 和 4.39%。多酚氧化酶参与有机质矿化过程中酚类物质的转化,是土壤腐殖化的一种媒介。蒋秋怡等研究表明:多酚氧化酶活性的增强导致酚类物质在土壤中的积累,易造成连栽杉木中毒,可能是造成连栽杉木林生产力下降的一个原因<sup>[13]</sup>。

表 4 第一、二代木麻黄林根际土壤酶活性

林分	土壤深度 (cm)	区 域	脲 酶	磷酸酶	过氧化物酶	多酚氧化酶
一代林	表土层	根际 R	0.00458	1.617	1.60	0.376
		非根际 S	0.00373	0.823	1.40	0.356
	心土层	根际 R	0.00366	1.277	1.51	0.364
		非根际 S	0.00353	0.585	1.36	0.316
二代林	表土层	根际 R	0.00444	1.060	1.47	0.398
		非根际 S	0.00375	0.675	1.30	0.368
	心土层	根际 R	0.00365	0.346	1.42	0.380
		非根际 S	0.00353	0.201	1.26	0.356

注:脲酶活性以 24h 后 1g 土壤中  $\text{NH}_3 - \text{N}$  的毫克数表示;磷酸酶活性,以 2h 后 100g 土壤中  $\text{P}_2\text{O}_5$  的毫克数表示;多酚氧化酶活性以滴定相当于 1g 土壤的滤液的  $0.01\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{I}_2$  的毫升数表示;过氧化物酶活性,以 1g 土壤消耗的  $0.01\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{I}_2$  标准液的毫升数表示。

### 3 结论与讨论

根际土壤 pH 值的状况对植物生长是很重要的, pH 值的改变极大地影响着土壤中有效养分的含量、形态和转化过程,同时对植物根系的生长发育和吸收功能也产生巨大的影响,进而影响着养分的生物有效性。不同代数木麻黄林地根际 pH 小于非根际土壤,且连栽后根际土壤和非根际土壤 pH 值均呈下降趋势,在促进某些养分有效性转化的同时导致林地退化,对木麻黄根系有抑制或毒害作用,在生产过程中应通过营造混交林等途径及时进行调控,防止土壤产生恶性循环。

木麻黄连栽林地各土层有机质含量和阳离子交换量呈下降趋势,除土壤全磷、全钾外,第二代木麻黄根际和非根际土壤矿质养分和大量元素含量均低于一代林。CEC 值和水解性总酸度随着木麻黄连栽而降低,二代林的土壤供肥保肥能力下降,缓冲性能减弱。与一代林相比,二代木麻黄根际与非根际土壤的脲酶活性变化不大,磷酸酶活性和过氧化物酶活性减弱,多酚氧化酶活性增强。在不同的土层中,心土层

中根际土和非根际土在两代林分的性状差异相对较大。俞新妥等研究表明,多酚氧化酶与土壤腐殖质的腐殖化成负相关<sup>[12]</sup>。与杉木连栽相似,第二代木麻黄多酚氧化酶活性的增强,导致林地土壤形成腐殖质的量减少和有毒物质(酚类等)的积累,从而影响二代林的生长。

根据木麻黄连栽林地土壤及根际土壤性质变化的测定结果,表明连栽使根际土壤营养元素含量下降,土壤酶生物学活性明显减弱,根系吸收养分的能力下降,木麻黄连栽过程已出现地力减退的迹象,这与木麻黄生长过程对土壤养分的消耗,与当地群众扒走木麻黄林地凋落物,养分不能及时回归林地和有毒物质的累积等有关,致使林木生长受阻,二代更新较为困难<sup>[1]</sup>。为保持木麻黄人工林的长期生产力,应通过营造混交林或更换树种轮栽、及时施肥补充养分损失、加强林下植被与凋落物管理等有效措施,以改善木麻黄防护林地土壤的养分状况,以维持和提高人工林土壤肥力,满足林木生长的需要,实现林地的持续利用和木麻黄防护林的可持续发展。(下转第 19 页)

展逐渐转换为经济系统与环境系统协调的主要动力。

#### 4 结论

本文构建了经济与环境系统的指标体系和协调度模型,可以定量地分析城市经济的发展与环境协调度的时间变化特征,深化了城市经济发展与环境协调度的研究。通过计算分析发现厦门市经济系统得分与环境系统的得分变化可以在时间维度上划分出三个阶段:1996~2001年的波动增长阶段;2002~2005年的平稳增长阶段;2006~2009年的转换阶段,经济系统得分稳定提高,环境系统得分出现先提高后降低,两者得分差距快速缩小,2009年经济系统得分首次超过环境系统得分。

1996~2009年厦门经济发展与环境协调过程可划分为四个阶段:环境主导型基本协调阶段、环境主导型初级较协调阶段、环境主导型较协调阶段、环境-经济转换型较协调阶段。从这一分析结果可以看出目前厦门市经济环境处于良性循环。今后一段时期,厦门市经济发展将由工业化中期阶段进入工业化后期阶段,资源环境约束增大,继续保持经济与环境良好协调度对区域可持续发展至关重要,在发展经济的同时,应警惕环境质量滑坡。

#### 参考文献

- [1] 桑秋,张平宇,苏飞,等. 20世纪90年代以来沈阳市人口、经济、空间与环境的协调度分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(2): 115~119
- [2] 尹海伟,孔繁花. 山东省各市经济环境协调度分析[J]. 人文地理, 2005(2): 30~31
- [3] 王辉,郭玲玲,宋丽. 辽宁省14市经济与环境协调度的时空演变研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(5): 35~40
- [4] 王辉,郭玲玲,宋丽. 辽宁省14市经济与环境协调度定量研究[J]. 地理科学进展, 2010, 29(4): 463~470
- [5] 尹晓波,李雪萍. 我国东中西部三地区环境与经济系统发展的协调度研究[J]. 经济地理, 2009, 29(4): 589~594
- [6] 张晓东,池天河. 90年代中国省级区域经济与环境协调度分析[J]. 地理研究, 2001, 20(4): 508~509
- [7] Alexis Saveriades. Establishing the social tourism carrying capacity for the tourist resorts of the east coast of the Republic of Cyprus [J]. Tourism Management, 2000, 21: 147~156
- [8] 杨士弘. 城市生态环境学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 120~121
- [9] 毕军,章申. 可持续发展的判别模式及其应用[J]. 中国环境科学, 1998, 18(S1): 30~36

(上接第4页)

#### 参考文献

- [1] 叶功富,张水松,黄传英,等. 木麻黄人工林地持续利用问题的探讨[J]. 林业科技开发, 1994, 8(4): 18~19
- [2] Kanpenjohann. M. Mineral nutrition on root development in stands of Casuarina equisetifolia of differing rigour on coastal stands of the people's Republic of begin. [J]. West Africa Potash Review, 1988, 5: 5~10
- [3] 叶功富,侯杰,张立华,等. 不同年龄木麻黄林地根际土壤养分含量和酶活性动态[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 86~89
- [4] 郑达贤,沙济琴. 福建滨海木麻黄林下土壤性质的变化及其林带更新的影响[J]. 地理学报, 1994, 49(3): 345~352
- [5] 谭芳林,李志真,叶功富,等. 木麻黄连栽对沿海沙地土壤养分及酶活性的影响[J]. 林业科学, 2003(专): 32~37

- [6] Lynch JM. The rhizosphere [M]. Chichester: Wiley, 1990
- [7] 国家林业局. 中华人民共和国林业行业标准(LY/T1210~1275-1999) [S]. 北京: 标准出版社, 2000
- [8] 关松荫,等. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1996
- [9] 杨玉盛,俞新妥. 不同栽杉代数根际土壤肥力及生物学特性变化[J]. 应用与环境生物学报, 1999, 5(3): 254~258
- [10] 魏勇,张焕朝,张金屯. 杨树根际土壤磷的分布特征及其有效性[J]. 南京林业大学学报, 2003, 27(5): 20~25
- [11] 丁应祥,梁珍海. 滨海土壤上杨树根际微区性状的研究[J]. 南京林业大学学报, 1996, 20(2): 15~19
- [12] 俞新妥,张其水. 杉木连栽林地土壤生化特性及土壤肥力的研究[J]. 应用生态学报, 1990, 1(2): 97~106
- [13] 蒋秋怡,叶仲节. 杉木根际土壤特性的研究(II) 杉木根际的生物化学特性[J]. 浙江林学院学报, 1991, 8(4): 450~456