

桂西北秃杉人工林土壤肥力变化的研究

何 斌¹, 卢万鹏¹, 唐光卫², 吴显军², 廖倩苑¹,
李远航¹, 舒 凡¹, 刘 俊¹

(1. 广西大学林学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西凤山县凤旁林场, 广西 凤山 547600)

摘要:采用时空互换法,于广西南丹县山口林场选取不同林龄(9、14、20 a)的秃杉人工林作为研究对象,对其土壤物理性质、化学性质和生物化学性质(土壤酶活性)进行研究。结果表明:不同林分年龄土壤性质存在一定的差异,8、14、20 a 秃杉人工林表层土壤(0~20 cm)土壤密度分别为0.978、0.914、0.890 g·cm⁻³,总孔隙度分别为63.10%、65.53%、66.40%,土壤最大持水量分别为64.55%、71.70%、74.58%。随着林龄的增长,土壤各化学和生物化学指标的变化不尽相同,但林分年龄到20年生时,多数土壤养分和酶活性指标都有所升高,土壤肥力状况得到提高。

关键词:秃杉人工林;土壤物理性质;土壤化学性质;土壤酶活性

中图分类号:S714.8

文献标识码:A

Soil Fertility Change in *Taiwania flousiana* Plantation in Northwest Guangxi

HE Bin¹, LU Wan-peng¹, TANG Guang-wei², WU Xian-jun², LIAO Qian-yuan¹,
LI Yuan-hang¹, SHU Fan¹, LIU Jun¹

(1. Forestry College, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 2. Fengpang Forest Farm of Fengshan County, Fengshan 547600, Guangxi, China)

Abstract: *Taiwania flousiana* plantations with different stand ages (9-, 14- and 20-year-old) in Nandan Shankou Forest Farm of Guangxi were selected to study the soil physical and chemical properties and enzyme activities by spacial-temporal exchange method. The results showed that there existed differences in the soil physical and chemical properties and enzyme activities among the 3 age classes of *T. flousiana* plantations. The surface soil (0–20 cm) density, total porosity and maximum moisture capacity were 0.978 g·cm⁻³, 63.10% and 64.55% in 8-year-old *T. flousiana* plantation; 0.914 g·cm⁻³, 65.53% and 71.70% in 14-year-old *T. flousiana* plantation; and 0.890 g·cm⁻³, 66.40% and 74.58 in 20-year-old *T. flousiana* plantation. With the increase of stand age, the changes of soil chemical and biochemical indicators were not the same, but to 20-year-old forest period, most soil nutrient and enzyme activity index increased, the soil fertility conditions improved.

Key words: *Taiwania flousiana* plantation; soil physical properties; soil chemical properties; soil enzyme activity

秃杉(*Taiwania flousiana* Gaussen)为我国特有的世界稀有珍贵树种,天然分布在贵州省东南部、云南省西部和湖北省西南部等地,垂直分布于海拔

800~2500 m,其生态适应性较强,并具有生长速度快、材质好、单位面积蓄积量高以及树体挺拔优美、枝叶繁茂等优点,经济价值和观赏价值均较高^[1-3]。

收稿日期:2014-03-14

基金项目:中央财政林业科技推广示范资金项目(2009-TG06);广西重大林业科技项目(2010-7)和广西农业成果转化资金项目(桂科转0896002-11)。

作者简介:何斌(1962—),男,研究员,从事森林土壤和森林生态方面的研究。E-mail:hebin8812@163.com

自20世纪70年代末以来,广西南丹县山口林场等单位先后引种秃杉,经过30多年的引种栽培和相关试验研究表明,秃杉能够适应桂西北中、低山的气候和土壤,具有生长迅速、速生时间长和生物生产力高等优点,成为当地杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)采伐迹地更新的优良树种之一^[4-5],同时也是广西2010—2020年重点发展的珍贵及乡土树种之一。土壤是森林存在和发展的物质基础,也是森林生态系统研究的重要组成部分^[6-9]。随着生态环境问题的日益突出及不合理经营所造成林地生产力的严重退化,森林经营过程中土壤状况的动态变化越来越为国内外林学专家和森林经营者所重视^[10-11],开展人工林土壤肥力性质变化的研究,对揭示人工林土壤肥力演变规律与趋势,维护、保持以至提高人工林土壤肥力,促进人工林的可持续发展有着极其重要的意义。目前,有关秃杉人工林土壤肥力性状方面的研究已有报道^[12-13],但主要限于林龄较小(14年生及以下)土壤理化性状的研究。本研究以广西西北部(桂西北)南丹县山口林场9、14、20 a秃杉人工林为研究对象,通过对其土壤物理性质、化学性质和生物化学性质(酶活性)进行比较和分析,以期揭示秃杉人工林生长过程中土壤肥力的演变规律与趋势,为秃杉人工林的经营管理特别是林地养分管理提供参考。

1 研究区概况

研究区位于广西西北部的南丹县山口林场山口分场(107°1'~107°55'E,24°42'~25°37'N),属中亚热带山地气候区,多数分布在海拔500~1000 m,地形较复杂,年平均气温16.9℃,年降水量1498.2 mm,降雨主要集中在4—10月,月均降水量在100 mm以上。因受高原气候的影响,冬春季多小雨和大雾天气;年均蒸发量1135 mm,年均相对湿度83%,年均日照时数1257 h,≥10℃的年均活动积温5244℃。标准样地位于山坡中部,东南坡,坡度27~30°,海拔950~1000 m,土壤类型为砂岩发育形成的山地黄壤,土壤平均厚度在80 cm以上,腐殖质层厚度约16~20 cm。

试验地前茬林分均为杉木人工林,于各自造林前1年的11—12月采伐,经炼山和清理后进行挖穴整地,种植穴规格为0.4 m×0.4 m×0.3 m。次年3月用1年生秃杉实生苗定植,定植后当年5—6月铲草抚育1次,第2至第3年每年分别在5—6月、9—10月各铲草抚育1次,第4年于8—9全面砍草抚育1次;随后于第9年和第13年分别进行间伐,经间伐和林分自疏后不同林龄秃杉人工林林分特征见表1。

表1 不同林龄秃杉人工林林分特征

林龄 /a	密度 /(株·hm ⁻²)	郁闭 度	平均胸径 /cm	平均树高 /m	主要林下植被
9	2100	0.7	9.5	10.5	盐肤木、粗叶悬钩子、蔓生莠竹、五节芒等,覆盖度约60%,凋落物平均厚度1 cm
14	1750	0.8	15.6	13.8	木姜子、杜茎山、山乌柏、紫萁、乌蕨等,覆盖度约75%,凋落物层厚度约1.6 cm
20	1500	0.8	20.5	17.4	华南毛柃、杜茎山、毛桐、狗脊蕨、紫萁等,覆盖度约70%,凋落物平均厚度2.5 cm

注:盐肤木(*Rhus chinensis* Mill.)、粗叶悬钩子(*Rubus alceaefolius* Poir.)、蔓生莠竹(*Microstegium vegans* (Nees) A. Camus)、五节芒(*Miscanthus floridulus* (Lab.) Warb. ex Schum. et Laut.)、木姜子(*Litsea pungens* Hemsl.)、杜茎山(*Maesa japonica* (Thunb.) Moritz)、山乌柏(*Sapium discolor* (Champ. ex Benth.) Muell)、紫萁(*Osmunda japonica* Thunb.)、乌蕨(*Stenoloma chusanum* Ching)、华南毛柃(*Eurya ciliate* Merr.)、毛桐(*Mallotus barbatus* (Wall. ex Baill.) Muell.-Arg.)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica* (L. f.) Sm.)。

2 研究方法

2.1 标准地设置与土壤样品采集

本研究采用空间代替时间的方法,先在9、14和20年生秃杉人工林内分别选择邻近分布、立地条件基本一致地段,各设置3块20 m×20 m的标准地,然后在每块标准地内随机设置3个代表性土壤剖面,按0~20 cm和20~40 cm分层采集土壤样品,相同样地同一土层样品混合均匀后按四分法取样装入布口袋,带回实验室内,用于测定土壤化学性质和

酶活性;同时,用100 cm³不锈钢环刀采集原状土壤,用于测定土壤水分-物理性质。土壤样品采集时间为2012年11月。

2.2 土壤样品分析与测定

2.2.1 土壤物理性质 土壤含水量用烘干法测定;土壤密度、孔隙度和持水量用环刀法测定^[14]。

2.2.2 土壤化学性质 土壤pH值用电位法测定;有机质含量用重铬酸钾氧化-外加热法测定;全氮含量用凯氏定氮法测定;全磷和全钾用氢氧化钠熔融后,全钾、全磷含量分别用火焰光度计法和钼锑抗比

色法测定;水解氮含量用碱解扩散法测定;有效磷含量用双酸(H_2SO_4-HCl)浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾含量用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定^[16]。详细实验方法参见文献[15~16]。

2.2.3 土壤酶活性 土壤过氧化氢酶用 J. C. Johnson 和 K. L. Temple 法测定;蛋白酶用 G. Hoffmann 和 K. Teicher 法测定;脲酶用 G. Hoffmann 与 K. Teicher 法测定;酸性磷酸酶用 G. Hoffmann 法测定^[17-18]

2.3 数据处理

使用 Excel 及 SPSS 统计软件进行数据统计和分析。

3 结果与分析

3.1 土壤孔隙与水分状况

从表2可以看出:不同林龄秃杉人工林土壤密

度为 $0.890 \sim 1.062 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 土壤总孔隙度为 $59.94\% \sim 66.40\%$, 土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度分别为 $50.71\% \sim 53.65\%$ 和 $7.75\% \sim 15.27\%$ 。可见,该区域秃杉人工林林地土壤较疏松,通气透水能力较强,这也是当地秃杉林生长良好并具有较高生物生产力的主要原因之一^[5]。从土壤密度和土壤孔隙状况的变化看,虽然不同林龄同一土层之间的差异不显著($P > 0.05$),但土壤密度均表现出随林龄的增长而下降的趋势,土壤非毛管孔隙度和总孔隙度则表现出相反的变化规律。在土壤结构和孔隙状况等综合反映的土壤持水供水特性中,不同土层的毛管持水量、非毛管持水量和田间持水量均表现出随林龄增长而增加的趋势(表3),但 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层的最大持水量在9年生和20年生之间差异显著($P < 0.05$)。

表2 不同林龄秃杉人工林土壤密度和孔隙状况

林龄/a	土层/cm	土壤密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	总孔隙度/%
9	0~20	$0.978 \pm 0.045A$	$50.71 \pm 1.18 A$	$12.39 \pm 2.61A$	$63.10 \pm 1.70A$
	20~40	$1.062 \pm 0.081a$	$52.19 \pm 1.73a$	$7.75 \pm 1.33a$	$59.94 \pm 3.05a$
14	0~20	$0.914 \pm 0.044 A$	$52.33 \pm 1.77A$	$13.20 \pm 2.18A$	$65.53 \pm 1.64A$
	20~40	$1.021 \pm 0.035a$	$53.20 \pm 1.65a$	$8.27 \pm 1.50a$	$61.47 \pm 1.31a$
20	0~20	$0.890 \pm 0.035 A$	$51.13 \pm 1.81A$	$15.27 \pm 1.43A$	$66.40 \pm 1.27A$
	20~40	$0.977 \pm 0.028a$	$53.65 \pm 1.47a$	$9.47 \pm 2.06a$	$63.12 \pm 1.05a$

注:表中数值为平均值±标准差,相同土层同列数据后的不同大写或小写字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。

表3 不同林龄秃杉人工林土壤水分状况

林龄/a	土层/cm	最大持水量/%	毛管持水量/%	非毛管持水量/%	田间持水量/%
9	0~20	$64.55 \pm 4.66A$	$51.87 \pm 1.84A$	$12.68 \pm 3.24A$	$29.87 \pm 2.27A$
	20~40	$56.46 \pm 7.13a$	$49.16 \pm 5.33a$	$7.30 \pm 1.80a$	$26.12 \pm 2.10a$
14	0~20	$71.70 \pm 5.23A$	$57.27 \pm 3.73A$	$14.43 \pm 2.78A$	$32.28 \pm 4.05A$
	20~40	$60.18 \pm 3.34a$	$52.07 \pm 2.99a$	$8.10 \pm 1.55 a$	$26.60 \pm 2.86a$
20	0~20	$74.58 \pm 4.33B$	$57.43 \pm 3.81A$	$17.15 \pm 1.78A$	$34.27 \pm 3.16A$
	20~40	$64.58 \pm 2.89a$	$54.89 \pm 1.76a$	$9.69 \pm 2.36a$	$29.52 \pm 2.95a$

3.2 土壤化学性质

从表4可看出:秃杉人工林不同土层有机质含量均随林龄的增长而增加,但土壤pH值却呈相反的趋势,表明秃杉林的生长有利于土壤有机质的生

物积累,但随着土壤有机物质的增加,其分解过程中所产生的有机酸也会随之增加,从而导致土壤pH值随林龄的增长而下降的变化;从土壤主要养分含量看,不同土层的全氮和水解氮含量均随林龄的增

表4 不同林龄秃杉人工林土壤化学性质

林龄/a	土层/cm	pH值	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	水解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
9	0~20	$4.62 \pm 0.14A$	$63.26 \pm 6.43A$	$2.87 \pm 0.24A$	$286.4 \pm 24.8A$	$2.15 \pm 0.20A$	$125.8 \pm 13.3A$
	20~40	$4.83 \pm 0.17a$	$33.42 \pm 3.50a$	$1.62 \pm 0.14a$	$142.8 \pm 11.6a$	$0.82 \pm 0.13a$	$35.7 \pm 4.24a$
14	0~20	$4.50 \pm 0.14A$	$65.02 \pm 6.54A$	$3.08 \pm 0.32A$	$301.5 \pm 21.5A$	$1.78 \pm 0.24A$	$107.4 \pm 6.8B$
	20~40	$4.78 \pm 0.19a$	$34.10 \pm 2.28a$	$1.85 \pm 0.13a$	$158.3 \pm 19.3a$	$0.75 \pm 0.14a$	$28.3 \pm 4.3b$
20	0~20	$4.38 \pm 0.13A$	$68.31 \pm 5.71A$	$3.37 \pm 0.29A$	$347.6 \pm 28.1A$	$2.87 \pm 0.34B$	$136.2 \pm 13.0C$
	20~40	$4.71 \pm 0.15a$	$37.23 \pm 3.62a$	$2.04 \pm 0.24a$	$177.6 \pm 15.8b$	$1.03 \pm 0.21c$	$39.6 \pm 5.2c$

长而增加,土壤速效磷和速效钾含量则表现出随林龄的增长先下降(9~14年生)后增加(14~20年生)的变化规律。总的来看,虽然各养分指标的变化不尽相同,且3个林龄之间土壤养分含量的差异多数不显著,但林龄20年生时,各土壤主要养分含量都有所提高,其中,0~20 cm土层的提高幅度较明显。

3.3 土壤酶活性

土壤酶活性既能反映土壤生物化学过程的强度和方向,还可以客观反映土壤碳、氮、磷等的动态变化,已成为表征土壤肥力的重要指标^[18-19]。从表5可见:秃杉人工林不同土层4种土壤酶活性大体上表现出与土壤有机质、全氮和速效性养分含量相似的变化趋势,即随林龄的增长而增大,同时也反映出土壤酶活性与其相应的林分植物现存量的关系^[5],即单位面积的植物产量越大,其土壤酶活性也越高^[18];但在同一土层,不同林龄之间土壤酶活性的差异均不显著。就土壤酶活性随林龄的变化规律而言,4种土壤酶活性在不同土层的变化规律并不完全相同,在不同土层中,土壤氧化还原酶中的过氧化氢酶的酶活性均表现出随林龄的增长而增大的趋

势,且0~20 cm土层的增大幅度明显比20~40 cm的高,而不同土层的蛋白酶和脲酶2种水解酶活性虽然在9到20年生之间均表现出增大趋势,但其变化过程因土壤深度的不同而存在一定差异,其中,0~20 cm的变化规律与过氧化氢酶的不同,即随林龄的增长而增加,但20~40 cm土层则呈现出随林龄的增长先下降(9~14年生)后增加(9~14年生)的变化规律。秃杉主要适生于南方红壤和黄壤地区酸性磷酸酶较高的土壤中,因此,酸性磷酸酶活性可以反映土壤供应有效磷的潜在能力。秃杉人工林不同土层酸性磷酸酶活性均表现出与过氧化氢酶相同的变化趋势,即均随林龄的增长而增大。

大量研究表明^[20],森林土壤酶活性与土壤养分之间存在着良好的相关关系。通过对秃杉人工林土壤酶与土壤主要养分的相关分析(表6)表明:无论是氧化还原酶中的过氧化氢酶还是水解酶中的蛋白酶、脲酶和酸性磷酸酶,均与土壤有机质、全氮、水解氮和速效磷呈极显著的相关关系($P < 0.01$),但与土壤速效钾的关系并不密切,这与前人对其他森林土壤的多数研究结果存在一定的差异^[18,20]。

表5 不同林龄秃杉人工林土壤酶活性

林龄/a	土层/cm	过氧化氢酶/(mL·g ⁻¹)	蛋白酶/(mg·g ⁻¹)	脲酶/(mg·g ⁻¹)	酸性磷酸酶/(mg·g ⁻¹)
9	0~20	1.03 ± 0.08A	0.408 ± 0.073A	0.669 ± 0.147A	0.866 ± 0.071A
	20~40	0.81 ± 0.11a	0.257 ± 0.050a	0.520 ± 0.060a	0.553 ± 0.063a
14	0~20	1.17 ± 0.09A	0.439 ± 0.066A	0.744 ± 0.076A	0.939 ± 0.087A
	20~40	0.84 ± 0.14a	0.238 ± 0.057a	0.509 ± 0.071a	0.632 ± 0.086a
20	0~20	1.40 ± 0.15C	0.581 ± 0.065B	0.857 ± 0.108A	1.063 ± 0.129B
	20~40	0.92 ± 0.12a	0.265 ± 0.042a	0.558 ± 0.041a	0.695 ± 0.055b

表6 秃杉人工林土壤酶活性与土壤养分间的相关性

项目	有机质	全氮	水解氮	速效磷	速效钾
过氧化氢酶	0.771 **	0.801 **	0.837 **	0.822 **	0.231
脲酶	0.892 **	0.914 **	0.900 **	0.892 **	0.354
蛋白酶	0.794 **	0.816 **	0.808 **	0.783 **	0.346
酸性磷酸酶	0.912 **	0.933 **	0.915 **	0.873 **	0.398

注:n=18; * $P < 0.05$, $r = 0.468$; ** $P < 0.01$, $r = 0.590$ 。

4 结论与讨论

研究表明,桂西北秃杉人工林土壤物理性质随林龄的增长而发生变化,无论是0~20 cm土层还是20~40 cm土层,其非毛管孔隙度和总孔隙度均随林龄的增长而增加,土壤毛管持水量、非毛管持水量和田间持水量也表现出相同的变化趋势,但土壤密度则与上述恰好相反。表明秃杉林的生长,在一

定程度上改良了土壤结构,改善土壤孔隙状况,而随着土壤非毛管孔隙度的增加,提高了土壤对降水的截持和贮存能力,有利于林地水土保持和林木的生长。

随林龄的增长,秃杉人工林各土壤养分含量的变化规律不尽相同,但其总体变化趋势基本一致,土壤有机质、全氮和水解氮含量随林龄的增长而增加,土壤速效磷和速效钾含量则在9到14年生间表现出随林龄的增长先下降后增加的趋势,这可能是9年后尤其13年生时先后进行林木间伐,林地光照增强,林木生长加速,草本、灌木生长也较旺盛,对土壤速效磷、钾养分需求较大,而通过凋落物返回土壤中的养分较少,林地土壤养分供应不足,造成供应不平衡所致。随着林龄增长到20年生,林分郁闭度增

大,林木及草本、灌木生长趋向稳定或有所下降,虽然对土壤有效性磷、钾养分需求还较大,但此时林地有机物质积累增多,土壤有机质生物积累增大且促进土壤中磷、钾元素的生物循环,从而提高土壤中速效性磷、钾含量。秃杉林土壤酶活性也表现出与主要土壤养分含量相似的变化趋势,不论是氧化还原酶中的过氧化氢酶,还是水解酶中的脲酶、蛋白酶和酸性磷酸酶,从 9 年生到 20 年生,其活性均有所提高,且与土壤主要养分之间多数呈极显著的正相关关系。由此可见,秃杉林的生长不但有利于林地土壤主要养分的生物积累,而且对土壤酶活性的提高也有促进作用。

秃杉作为我国特有的稀有珍贵树种,经过多年的引种栽培和相关研究,目前已成为杉木多代连栽采伐迹地的优良替代树种之一。与杉木人工林相比^[21],秃杉林早期凋落物量也较少,但随着秃杉林分的生长,凋落物越来越丰富,其组成中以养分丰富且较易分解的针叶和柔软小枝占绝大多数^[5],分解速率较快,养分归还量逐渐增大,从而促进林地土壤有机质、全氮和速效性氮、磷、钾养分的生物积累,土壤结构和水分状况逐步得到改善,土壤酶活性也相应得以增强。因此,在杉木采伐迹地营造秃杉人工林,有利于土壤肥力的恢复、维持和提高,防止地力衰退。由于秃杉成熟期较晚(一般需要 40 年以上),速生时间长。因此,如果采用合理的经营管理措施培育具有更高经济价值的秃杉大径材,虽然经营时间较长,但更能提高林地生产力,也更有利于土壤肥力的恢复、维持和提高,从而具有更显著的经济效益和生态效益。

参考文献:

- [1] 洪菊生,潘志刚,施行博,等.秃杉的引种与栽培研究[J].林业科技通讯,1997(1):7-14.
- [2] 陈建新,王明怀,殷祚云,等.广东省秃杉引种栽培效果及栽培区划分研究[J].林业科学研究,2002,15(4):399-405.
- [3] 何斌,黄恒川,黄承标,等.秃杉人工林营养元素含量、积累与分配特征的研究[J].自然资源学报,2008,23(5):903-910.
- [4] 何斌,刁海林,黄恒川,等.秃杉人工林生物量与生产力的变化规律[J].北京林业大学学报,2008,36(9):17-19.

- [5] 何斌,黄寿先,招礼军,等.秃杉人工林生态系统碳素积累的动态特征[J].林业科学,2009,45(9):151-157.
- [6] Holmes P M. Shrubland restoration following woody alien invasion and mining: Effects of top soil depth, seed source, and fertilizer addition[J]. Restoration Ecology, 2001, 9: 71-84.
- [7] La Manna L, Rajchenberg M. Soil properties and *Austrocedrus chilensis* forest decline in Central Patagonia Argentina[J]. Plant and Soil, 2004, 263(1/2): 29-41.
- [8] Firm J, Erskine P D, Lamb D. Woody species diversity influences productivity and soil nutrient availability in tropical plantations[J]. Oecologia, 2007, 154: 521-533.
- [9] Bloor J, Bardgett R D. Stability of above-ground and below-ground processes to extreme drought in model grassland ecosystems: Interactions with plant species diversity and soil nitrogen availability[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2012, 14: 193-204.
- [10] 王彦辉,肖文发,张星耀.森林健康监测与评价的国内外现状和发展趋势[J].林业科学,2007,43(7):78-85.
- [11] 贾忠奎.我国人工林长期生产力维持技术研究进展[J].世界林业研究,2012,25(1):49-54.
- [12] 邹礼光.秃杉人工林林下植物和土壤肥力的研究[J].防护林科技,2005(9):1-3.
- [13] 黄承标,曹继钊,吴庆标,等.秃杉林与杉木连栽林的土壤理化性质及林木生长量比较[J].林业科学,2010,46(4):1-7.
- [14] 中华人民共和国林业部科技司.林业标准汇编(三)[S].北京:中国林业出版社,1991.
- [15] 中国土壤学会农业化学专业委员会.土壤农业化学常规分析方法[M].北京:科学出版社,1983.
- [16] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
- [17] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:中国农业出版社,1986:136-152.
- [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] Allison V, Condron L, Peltzer D A, et al. Changes in enzyme activities and soil microbial community composition along carbon and nutrient gradients at the Franz Josef chronosequence, New Zealand[J]. Soil Biology & Biocemistry, 2007, 39: 1770-1781.
- [20] 林娜,刘勇,李国雷,等.森林土壤酶研究进展[J].世界林业研究,2010,23(4):21-25.
- [21] 陈玉萍,何斌,蒙跃环,等.第2代杉木人工林营养元素积累的动态特征[J].中南林业科技大学学报,2009,23(2):16-20.