

黄龙山林区封育油松林土壤养分研究

侯琳, 雷瑞德, 王得祥, 康博文, 刘建军

(西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] 对6个不同封育年限的天然次生油松林林地土壤肥力和酶含量进行了分析。结果表明,对于同一封育年限的油松林地,土壤有机质、硝态氮、速效磷和脲酶含量随采样深度增加而减小;在封育的前30年,林地表层土壤有机质含量随封育年限增加而减小,硝态氮、氨态氮和脲酶含量随封育年限增加表现出先减小后增大的趋势,速效钾、速效磷和过氧化氢酶含量表现出先增大后减小的趋势;封育30年后,林地表层土壤有机质和速效钾含量随封育年限增加而增加,硝态氮、氨态氮、速效磷和过氧化氢酶含量随封育年限增加表现出先增大后减小的趋势,脲酶含量则表现出先减小后增大的趋势。主成分分析结果表明,随着封育年限的增加,土壤综合因子值总体有下降的特征,为了加速有机质分解,提高林地肥力水平,对封育30年后的林分应进行卫生伐和择伐。

[关键词] 油松; 封育; 土壤养分; 酶活性; 主成分分析

[中图分类号] S714.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)02-0063-06

Study on soil nutrient and enzyme in hill closed and afforested natural secondary *Pinus tabulaeformis* forest land in Huanglong mountain

HOU Lin, LEI Rui-de, WANG De-xiang, KANG Bo-wen, LIU Jian-jun

(College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil nutrient and enzyme contents of natural secondary *Pinus tabulaeformis* forest land among 6 hill closed and afforested (H & A) ages were analyzed. The results show that in the same H & A, with depth of soil increasing, contents of organic matter (OM), $\text{NO}_3^- \text{N}$, available phosphorus (AP) and urease decreased respectively. During 30 years before H & A, in the depth of 0 to 20 cm of soil, with the increase of H & A, OM decreased continuously. Meanwhile, contents of $\text{NO}_3^- \text{N}$, $\text{NH}_4^+ \text{N}$ and urease demonstrated a trend from increase to decrease. However, contents of available potassium (AK), AP and CAT indicated a reversed trend. Furthermore, 30 years after H & A, with the increase of H & A, contents of OM and AK increased continuously. In the same time, contents of $\text{NO}_3^- \text{N}$, $\text{NH}_4^+ \text{N}$, AP and CAT showed a trend increase to decrease. On the contrary, content of urease took on a reversed trend. Based on principle components analysis, values of soil comprehensive factor decreased. For the purpose to improve whole level of nutrient in *Pinus tabulaeformis* forest land, selective cut should be carried out 30 years after H & A.

Key words: *Pinus tabulaeformis*; hill closed and afforested; soil nutrient; enzyme activity; principle components analysis

[收稿日期] 2005-12-30

[基金项目] 国家科技攻关计划重大专项专题项目(2003BA516A15-05); 西北农林科技大学青年基金项目(QN-2003-07)

[作者简介] 侯琳(1969-), 男, 陕西武功人, 副研究员, 在读博士, 主要从事黄土高原退化森林生态系统研究。E-mail: houlin1969@163.com

[通讯作者] 雷瑞德(1944-), 男, 陕西西安人, 教授, 博士生导师, 主要从事森林生态学研究。

封山育林是以封禁为手段,利用植被的天然更新能力和植物群落的自然演替规律,促进新林形成的措施。我国开展封山育林工作较早,但研究内容多集中于封育的生态经济作用、封育效益、封育林分植被盖度、物种的多样性特征^[1-3]等方面,对封育后林地土壤动态特征方面的研究尚不多见。土壤养分和酶是森林生态系统的重要组成成分,土壤养分含量直接影响林木的生长,参与森林生态系统的能量流动和物质循环,而土壤酶参与土壤的许多重要的生物化学过程和物质循环,可以客观地反映土壤的肥力状况^[4]。黄龙山林区是陕西黄土高原森林分布最集中、野生动植物资源最丰富的地区,是庇护陕北黄土高原南部与渭北高原和关中平原的主要生态屏障。油松是我国特有树种,构成了我国北方温带针叶林中分布最广的群落,也是黄龙山林区的主要成林树种之一,研究不同封育年限油松林地的土壤养分及酶含量,对于合理利用土壤、科学经营和保护天然林具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区地处黄土高原高原沟壑区与丘陵沟壑区交错地带的陕西省黄龙县,地理位置为东经109°38′49″~110°12′47″,北纬35°28′49″~36°02′01″。气候属大陆性暖温带半湿润气候类型,年均气温8.6℃,极端最高气温为36.7℃,极端最低气温为-22.5℃,≥10℃的积温为2977℃,年日照2370h,无霜期175d,年均降水量611.8mm,区内海拔1100~1300m,相对高差100~200m。林地土壤为褐土。森林植被属暖温带落叶阔叶林地带北部落叶阔叶林亚地带,油松天然次生林在该区主要分布于阴坡,林下植被种类较多。

从20世纪50年代后期起,黄龙山林业局有关林场实行了封山育林措施以恢复植被,封育方式为全封。目前,通过这种恢复方式形成的多为油松单优种群,乔木层依然可见辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、华北丁香(*Syringa oblata*)、山杨(*Populus davidiana*)、山桃(*Prunus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)和漆树(*Toxicodendron vernicifluum*),灌木层种类相对丰富。

1.2 土样的选取

2003-08,选择不同封育年限的天然次生油松林

为研究对象,根据种群的封育年限和空间位置设置样地,乔木样地大小为20m×20m^[5]。在每块研究样地上,随机选择3个样点取土样,地表凋落物的取样用1m²的方框在取样点上确定样方。凋落物取样之后,从地表开始,采用常规采样法取0~60cm^[4]土层的土样,每个土样500g左右,装入布袋,带回室内分析,共挖掘土壤剖面93个。

1.3 测定项目及其方法

土样测定前,按常规方法处理^[4-5]。将水土按体积比2.5:1混合后,用pH计测土壤pH;有机质含量用重铬酸钾容量法测定;硝态氮和铵态氮含量采用连续流动分析仪测定;速效氮含量用碱解扩散法测定;用0.5mol/L碳酸氢钠提取土壤样品后,用钼蓝比色法测速效P含量;用1mol/L的中性醋酸钠提取土壤样品后,用火焰光度计测速效K含量^[4-5]。过氧化氢酶含量用高锰酸钾滴定法测定,脲酶含量用扩散法测定^[6]。同一土样相同指标测3次,测定结果取均值。

1.4 数据处理

选择不同封育年限0~20cm土样的有机质含量(x_1)、土壤pH(x_2)、速效氮含量(x_3)、速效磷含量(x_4)、速效钾含量(x_5)、脲酶含量(x_6)和过氧化氢酶含量(x_7)作为参试因子进行主成分分析^[7]。但由于各指标间量纲不统一,缺乏可比性,因此在利用上述指标时,必须对参评因子进行标准化处理。各参评因子的标准化公式为:

$$Y = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

式中:Y为各因子标准化后的结果, x_i 为各因子测定值, $x_{\max}$ 为各因子测定值的最大值, $x_{\min}$ 为各因子测定值的最小值^[8]。

采用SAS和Matlab软件计算主成分分析结果^[9-10]。土壤养分平均数多重比较采用SAS软件处理。

2 结果与分析

2.1 不同封育年限油松林地土壤pH值和养分含量的变化

枯落物归还土壤是天然林自我培肥地力的重要途径之一,与矿物质共同作为林木营养的来源。不同封育年限油松林地土壤pH值和养分含量的变化见表1。

表 1 不同封育年限油松林地土壤的 pH 值和养分含量变化

Table 1 Variety of pH and nutrients in *Pinus tabulaeformis* forest land among different H & A

封育年限 Hilclosed and afforested ages	土层深度/cm Soil depth	pH	有机质含量/ (g · kg ⁻¹) Organic matter	硝态氮/ (mg · kg ⁻¹) NO ₃ ⁻ · N	氨态氮 /(mg · kg ⁻¹) NH ₄ ⁺ · N	速效钾/ (mg · kg ⁻¹) A vailable potassium	速效磷/ (mg · kg ⁻¹) A vailable phosphorus
16	0~ 20	8.4	25.5	4.9	22.3	181.6	3.9
	20~ 40	8.6	8.7	3.4	21.1	99.7	3.3
	40~ 60	8.6	7.4	1.6	19.4	98.3	1.6
25	0~ 20	8.4	20.1	2.9	17.8	248.1	4.3
	20~ 40	8.6	7.4	1.9	16.4	117.3	2.6
	40~ 60	8.6	6.5	1.9	20.3	103.5	2.2
30	0~ 20	8.3	18.5	8.0	24.0	175.2	3.6
	20~ 40	8.5	8.3	6.2	16.3	116.3	3.0
	40~ 60	8.5	5.6	3.1	17.1	115.5	2.7
45	0~ 20	8.3	23.6	2.3	13.5	162.5	3.8
	20~ 40	8.5	9.3	1.8	13.3	127.9	3.1
	40~ 60	8.6	8.7	1.8	15.2	112.4	2.8
60	0~ 20	8.2	29.7	2.7	20.3	164.9	8.2
	20~ 40	8.4	10.4	1.4	19.2	111.4	8.1
	40~ 60	8.4	9.4	1.2	18.4	114.1	6.7
75	0~ 20	8.3	34.2	2.4	17.4	190.4	6.7
	20~ 40	8.4	10.0	1.4	13.2	181.2	6.0
	40~ 60	8.5	6.5	1.3	11.2	190.0	2.8

2.1.1 pH 值的变化 由表 1 可知,不同封育年限的油松林地,其土壤 pH 值均随着土层深度的增加而增加。这是由于表层土壤枯枝落叶层有机质的分解作用所致,因为针叶含油脂多,分解过程中产生的中间产物单宁、有机酸多,因此表层土壤的 pH 均有所下降,但仍是石灰性土壤。同一采样深度随着封育年限增加,土壤的 pH 值总体呈下降趋势。这是由于随着封育年限增加,林木个体增大,枯落物归还土壤的量及根系生物量增加所致。

2.1.2 有机质含量的变化 表 1 表明,对同一封育年限的油松林地,土壤有机质含量随采样深度的增加而减少。在封育的前 30 年,油松林地表层土壤有机质含量随封育年限增加而减少;在封育 30 年后,林地表层土壤有机质含量随封育年限增加而增加。封育 30~ 60 年时,在各个采样深度有机质含量均随封育年限增加而增加。土壤有机质的变化过程反映了油松林地土壤肥力的变化过程,即不同封育年限的林地表层土壤在封育前 30 年肥力下降,封育 30 年后肥力上升。其原因在于封育前 30 年,随着封育年限增加,林木个体增大,密度增加,林地内的物种丰富度增加,植物种对地力消耗较大,而枯落物归还量较小,因此有机质含量随封育年限增加而减少;而封育 30 年后,物种丰富度无显著变化,灌木密度下降,乔木的密度虽然在增加,但增加的多为弱小植株^[3],物种对地力消耗较小,枯落物归还量较大,加之乔木

郁闭度减小,有利于枯落物分解,因此地表土壤有机质含量随封育年限增加而增加。

2.1.3 氮含量的变化 由表 1 可知,不同封育年限相同深度土层,硝态氮含量在封育的前 30 年,总体随封育年限增加而升高,封育 30 年后随封育年限的增加而降低;不同封育年限林地氨态氮含量未表现出明显的变化规律。上述变化过程产生的原因与植物对 N 素的选择性吸收和林地土壤的 pH 值有关。研究区的土壤 pH 值为 8.2~ 8.6,属碱性,硝化过程可顺利进行,微生物分解有机物产生的有效态氮以能被植物有效利用的 NO₃⁻ · N 为主,因此在不同封育年限不同层次土壤中,NO₃⁻ · N 的含量均小于 NH₄⁺ · N。但大量研究表明,植物对 NH₄⁺ · N 和 NO₃⁻ · N 具有选择吸收的特性,即使同时供应 NH₄⁺ · N 和 NO₃⁻ · N,有些植物也会表现出明显的偏好性^[11-12]。虽然多数植物在同时供应 NH₄⁺ · N 和 NO₃⁻ · N 时表现出“联合效应”,但这一现象对树木是否具有普遍性目前尚不清楚^[13]。植物对氮素的吸收是一个复杂的生理过程,关于树木对氮素的吸收机制尚待进一步研究。

2.1.4 K 含量的变化 不同封育年限的油松林地表层土壤速效钾含量高于 20~ 40 cm 和 40~ 60 cm 2 个土层,这与表层土壤受植被影响较大有关。由于枯落物分解产生的营养元素主要存留于土壤表层,致使表层土壤中营养元素含量较高。封育的前 45 年,

20~ 40 cm 土壤速效钾含量略高于40~ 60 cm 土层;封育 45 年后, 20~ 40 cm 土层的土壤速效钾含量则略低于40~ 60 cm 土层。这可能是因为底层土壤受植被影响较弱, 其变化趋势未与群落演替表现出相关性。20~ 40 cm 和40~ 60 cm 2 个土层的土壤速效钾含量, 随封育年限增加总体呈增加的趋势, 这可能与母岩矿化有关。

2.1.5 P 含量的变化 不同封育年限的油松林地表层土壤的速效磷含量高于20~ 40 cm 和40~ 60 cm 2 个土层, 林地表层土壤速效磷含量为3.6~ 8.2 mg/kg, 低于全省土壤速效磷分级 5 级标准(10~ 15 mg/kg)^[14], 属严重缺磷土壤。同一层次的土壤速效磷含量随封育年限的增加而呈增加趋势的原因, 在于土壤有机质含量的增加, 因为土壤速效磷的含量主要受土壤中全磷和有机质含量的影响。

2.2 不同封育年限油松林地土壤酶含量的变化
土壤酶是土壤肥力的重要指标之一, 对土壤有机物质的转化起重要作用, 并对土壤养分有效性有重要影响。脲酶能将尿素很快分解为NH₃和CO₂, 从而降低尿素氮的利用率; 生物代谢过程中产生的氢氧自由基(OH·)是化学性质最活泼的活性氧, 几乎与细胞内的每一类有机物反应, 并有非常高的速度常数, 其破坏性极强, 但可以被过氧化氢酶CAT 分解^[4]。由表2 可以看出, 表层土壤脲酶含量总体高于其他 2 个土层, 且随着采样深度增加, 脲酶含量呈下降趋势, 这与速效氮含量变化有关。表层土壤过氧化氢酶含量总体低于其他 2 个层次; 随着封育年限和采样深度增加, 过氧化氢酶含量呈增加趋势, 这一变化趋势与关松荫^[6]的研究结论基本一致, 即“难分解的针叶林过氧化氢酶含量较低”。

表2 不同封育年限油松林地土壤酶含量的变化

Table 2 Variety soil enzymes in series of H & A <i>Pinus tabulaeformis</i> forest land							
封育年限 H illclosed and affores- tated ages	土层深度/cm Soil depth	脲酶/ (mg · kg ⁻¹) U rease	过氧化氢酶/ (mol · L ⁻¹) CAT	封育年限 H illclosed and affores- tated ages	土层深度/cm Soil depth	脲酶/ (mg · kg ⁻¹) U rease	过氧化氢酶/ (mol · L ⁻¹) CAT
16	0~ 20	0.32	1.934	45	0~ 20	0.21	1.833
	20~ 40	0.23	1.942		20~ 40	0.19	1.924
	40~ 60	0.20	1.927		40~ 60	0.19	1.943
25	0~ 20	0.34	1.952	60	0~ 20	0.19	1.883
	20~ 40	0.20	1.961		20~ 40	0.10	1.959
	40~ 60	0.09	1.965		40~ 60	0.08	1.965
30	0~ 20	0.47	1.886	75	0~ 20	0.29	1.814
	20~ 40	0.44	1.948		20~ 40	0.16	1.954
	40~ 60	0.26	1.939		40~ 60	0.09	1.962

2.3 不同封育年限油松林地表层土壤养分与酶含量的差异

表层土壤是受群落演替影响最大的土层, 对不

同封育年限油松林地表层土壤肥力指标差异进行统计分析, 可反映出天然油松林地土壤环境在不同封育年限的差别大小, 结果见表3。

表3 不同封育年限油松林地表层土壤养分与酶含量的差异

Table 3 Variety of soil nutrients and enzyme in upper layer and different H & A <i>Pinus tabulaeformis</i> forest land						
指标 Index of soil nutrient	封育年限 H illclose and afforested ages	16 a	25 a	30 a	45 a	60 a
有机质 Organic matter	25	5.47**				
	30	7.83**	5.15**			
	45	1.48	3.29	5.32**		
	60	4.20**	18.08**	22.66**	5.97**	
	75	3.09	5.32**	6.64**	4.73**	5.97**
硝态氮 NO ₃ -N	25	14.83**				
	30	13.36**	23.99**			
	45	18.72**	5.50**	31.56**		
	60	18.33**	2.25	27.94**	4.67**	
	75	8.83**	1.96	18.21**	0.49	1.52

续表 3 Continued of Table 3

指标 Index of soil nutrient	封育年限 Hillclose and afforested ages	16 a	25 a	30 a	45 a	60 a
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	25	18 46 ^{**}				
	30	6 06 ^{**}	30 57 ^{**}			
	45	26 56 ^{**}	14 50 ^{**}	36 29 ^{**}		
	60	4 72 ^{**}	7 22 ^{**}	10 59 ^{**}	18 76 ^{**}	
	75	5 48 ^{**}	0 29	8 36 ^{**}	4 78 ^{**}	3 38
速效钾 A vailable potassium	25	25 63 ^{**}				
	30	0 80	8 72 ^{**}			
	45	32 51 ^{**}	43 27 ^{**}	2 11		
	60	22 31 ^{**}	36 82 ^{**}	8 37 ^{**}	22 80 ^{**}	
	75	4 58 ^{**}	18 19 ^{**}	1 85	15 76 ^{**}	23 43 ^{**}
速效磷 A vailable phosphorus	25	2 74				
	30	0 96	2 37			
	45	0 58	8 52 ^{**}	1 09		
	60	33 58 ^{**}	65 29 ^{**}	17 83 ^{**}	13 73 ^{**}	
	75	7 60 ^{**}	6 87 ^{**}	7 34 ^{**}	9 29 ^{**}	5 07 ^{**}
脲酶 U rease	25	0 82				
	30	4 76 ^{**}	4 40 ^{**}			
	45	2 27	3 25	4 89 ^{**}		
	60	8 19 ^{**}	8 88 ^{**}	7 86 ^{**}	0 01	
	75	1 51	2 24	5 05 ^{**}	1 87	4 41 ^{**}

注: 不同封育年限土壤样品样本数 $n_{16}=12$; $n_{25}=12$; $n_{30}=15$; $n_{45}=21$; $n_{60}=15$; $n_{75}=18$; * *. 差异极显著($\alpha=0.01$)。
Note: Soil samples in different hillclosed and afforested ages, $n_{16}=12$; $n_{25}=12$; $n_{30}=15$; $n_{45}=21$; $n_{60}=15$; $n_{75}=18$; * *. Extremely significant difference ($\alpha=0.01$).

由表 3 可以看出, 在封育年限内, 油松林地表层土壤养分指标含量除在少数年限间差异不显著外, 在大多数年限间存在极显著差异。封育的前 30 年, 林分中中、幼龄个体比例较大, 林木生长旺盛, 为了减轻林下草本与乔木的养分竞争, 应清除树冠范围以内的杂草; 封育 30 年后, 林分中近熟个体居多, 过熟个体也占有相当大的比例, 林分郁闭度增大, 林内光照条件变差^[15], 不利于微生物活动和有机质分解, 此阶段应对林内弱小个体进行卫生伐, 择伐优势木, 改善林内光照环境。

2.4 不同封育年限的油松林地土壤养分与酶含量的主成分分析

森林土壤是在森林植被下产生和发育起来的,

是供给森林生活物质的基质。森林土壤具有其他土壤不具备的 3 种成土因素, 即森林死地被物、林木根系和依靠森林生存的特有生物群, 生物群通过对表土层凋落物的粉碎、分解和转化, 影响土壤性质和肥力^[12], 进而影响植物的生长和群落的演替。植物更新、发育与表层土壤关系密切。为了探明不同封育年限的油松林地 0~20 cm 土层土壤养分与酶含量的总体状况, 将有机质含量、土壤 pH、速效氮、速效磷、速效钾、脲酶、过氧化氢酶作为参试因子进行主成分分析。主成分的特征根和贡献率是选择主成分的依据, 将 0~20 cm 土层 7 个原性状指标转化为 7 个主成分, 结果见表 4。

表 4 不同封育年限的油松林地土壤养分与酶指标的主成分分析

Table 4 Principle components analysis of each soil nutrient and enzyme index in H & A Pinus tabulaeformis forest land				
序号 No.	指标 Index	特征根 λ Eigenvalue	贡献率 Contribution rate	累积贡献率 Cumulative contribution rate
R1	有机质含量 Organic matter	5.29	0.5559	0.5559
R2	pH	1.72	0.1809	0.7368
R3	速效氮 Available nitrogen	0.69	0.1721	0.9089
R4	速效磷 Available phosphorus	0.47	0.0911	1.0000
R5	速效钾 Available potassium	0.00	0.0000	1.0000
R6	脲酶 U rease	0.00	0.0000	1.0000
R7	过氧化氢酶 CAT	0.00	0.0000	1.0000

由表4可以看出,第1主成分的特征根为5.29,方差贡献率为55.59%,代表了全部养分信息的55.59%,是最重要的主成分;第2个主成分的特征根为1.72,代表了全部养分信息的18.09%,是仅次于第1主成分的重要主成分;第3个主成分的特征根为0.69,代表了全部养分信息的17.21%,是仅次于第3主成分的重要主成分。前3个主成分累计方差贡献率已达到80.89%,表明前3个主分量反映出土壤肥力的绝大部分信息。因此,可选取前3个主成分作为土壤肥力分析的综合指标。

为了揭示土壤肥力随封育年限的变化趋势,对土壤肥力的综合指标进行排序,结果见表5。

表5 不同封育年限油松林地土壤综合因子的排序

Table 5 Order of soil comprehensive factors in

H & A *Pinus tabulaeformis* forest land

封育年限 Hill closed and afforestation ages	土壤综合因子值(Y) Value of soil comprehensive factors	排序 Order
16	53.5	3
25	72.0	1
30	55.9	2
45	47.1	5
60	46.0	6
75	50.3	4

由表5可见,随着封育年限的增加,土壤综合因子值总体有下降的趋势,表明全封育方式并非适用于各林龄段的林分,为形成持续、稳定的林分,制订该区油松林经营与保护措施时,应将提高林地土壤肥力作为主要考虑因素之一。

3 结论与建议

对陕西黄土高原高原沟壑区和丘陵沟壑区气候交错地带6个不同封育年限的油松林林地土壤进行了养分和酶含量分析后认为:同一封育年限,土壤有机质、硝态氮、速效磷和脲酶含量随采样深度增加而减小。在封育的前30年,林地表层土壤有机质含量随封育年限增加而减小,硝态氮、氨态氮和脲酶含量随封育年限增加表现出先减小后增大的趋势,速效钾、速效磷和过氧化氢酶含量表现出先增大后减小的趋势;封育30年后,林地表层土壤有机质和速效钾含量随封育年限增加而增加,硝态氮、氨态氮、速效磷和过氧化氢酶含量随封育年限增加表现出先增大后减小的趋势,速效钾呈持续增加趋势;表层土壤

因受群落演替影响程度较大,不同封育年限养分指标间绝大多数存在极显著差异;随着封育年限的增加,土壤综合因子值总体有下降的特征。

一般封育30年后,林分逐渐郁闭,形质较差的林木个体数量增加^[3,15],这不仅徒耗地力,而且恶化了林内光照条件。根据对油松种群密度的预测,若继续封育,油松林将以中密度分布为主。林分密度是影响林分下层植物物种多样性的重要因子,也是森林经营中重要的可控因子^[16]。为了加速有机质分解,提高林地氮素水平,培肥地力,为林木更新提供良好的环境,建议对封育30年后的林分进行卫生伐和择伐。

[参考文献]

- [1] 王永安. 封山育林的生态经济作用[J]. 世界林业研究, 2000, 13(3): 19-25.
- [2] 杨逢建, 赵则海, 付玉杰, 等. 封山育林后天然次生林群落结构特征[J]. 植物研究, 2002, 22(4): 503-507.
- [3] 侯琳, 雷瑞德, 康博文, 等. 黄龙山林区油松封育过程中植物物种多样性特征[J]. 西北植物学报, 2004, 24(7): 1165-1172.
- [4] 薛立, 邝立刚, 陈红跃, 等. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 280-285.
- [5] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [6] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 1-13.
- [7] 徐克学. 生物数学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 33-37.
- [8] 李苏楠, 赵延治, 史培军. 西藏高原生态安全评价方法与应用[J]. 水土保持研究, 2005, 25(11): 142-145.
- [9] 胡小平, 王长发. SAS基础及统计实例教程[M]. 西安: 西安地图出版社, 2001: 176-181.
- [10] 张宜华. 精通MATLAB 5[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 151-157.
- [11] 张彦东, 白尚斌. 氮素形态对树木养分吸收和生长的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 2044-2048.
- [12] Boxman A W, Roelfs J G M. Some effects of nitrate versus ammonium nutrition on the nutrient fluxes in *Pinus sylvestris* seedling[J]. Can J Bot, 1988, 66: 1091-1097.
- [13] 张彦东, 范志强, 王庆成. 不同形态N素对水曲柳幼苗生长的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(5): 665-667.
- [14] 郭兆元. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 523-554.
- [15] 侯琳, 雷瑞德, 刘建军, 等. 黄龙山林区封育油松种群动态研究[J]. 生态学杂志, 2005, 24(11): 1263-1266.
- [16] 雷相东, 唐守正, 李冬兰, 等. 影响天然林下层植物物种多样性的林分因子的研究[J]. 生态学杂志, 2003, 22(3): 18-22.