

秦岭西部中幼龄华北落叶松林地土壤养分与酶活性特征研究

王伟东¹, 王渭玲^{1*}, 徐福利^{2,3}, 于钦民², 马惠玲¹

(1 西北农林科技大学生命科学学院, 陕西杨凌 712100; 2 西北农林科技大学资环学院, 陕西杨凌 712100;

3 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要【目的】作为最重要的速生造林树种, 50 多年前华北落叶松就被引入陕西并造林, 引种初期华北落叶松生长良好, 而近年来生长势明显下降, 地力衰退问题也日益受到关注。本文研究了秦岭西部中幼龄华北落叶松林地土壤养分与酶活性特征, 以期为华北落叶松幼龄期人工林的合理经营、中幼龄林地土壤生态系统结构、功能及其可持续利用提供科学依据。【方法】本试验选取立地条件基本一致的 5 a、10 a 和 20 a 的华北落叶松人工林地, 每个样地设置 20 m × 20 m 的标准地, 用土钻在每个标准地沿“S”型采集 5 个点的 0—20 cm、20—40 cm 和 40—60 cm 的土样, 各层混均, 用四分法取样, 分析不同林龄华北落叶松人工林地土壤剖面的 pH 值、有机质及氮、磷养分和酶活性。【结果】研究表明, 土壤 pH 值在 5 a 林地随土壤深度的增加逐渐升高, 而在 10 a 和 20 a 林地表现为先降低后显著升高 ($P < 0.05$), 不同林龄林地 0—20 cm 土层的 pH 值变化范围为 6.21 ~ 6.71, 表现为 10 a > 5 a > 20 a; 40—60 cm 和 20—40 cm 土层均表现为 5 a > 10 a > 20 a。不同林龄林地的表层 (0—20 cm) 土壤有机质含量变化范围为 18.68 ~ 25.89 g/kg, 均显著高于下层 (20—40 cm 和 40—60 cm) 土壤, 随着林龄的增加没有明显的变化趋势。土壤全氮、硝态氮、铵态氮和速效磷含量随着土壤深度的增加呈明显下降的趋势 ($P < 0.05$), 而在 0—20 cm 土层中, 20 a 林地的氮含量显著高于 5 a 和 10 a 林地的 ($P < 0.05$), 10 a 林地的速效磷含量最高。不同林龄的土壤蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性在 0—20 cm 土层显著高于 20—40 cm 和 40—60 cm 土层 ($P < 0.05$), 过氧化氢酶活性却呈相反的变化趋势。0—20 cm 土层, 不同林龄林地的蔗糖酶和脲酶活性表现为 10 a > 5 a > 20 a, 磷酸酶和过氧化氢酶活性在 20 a 林地土壤中最大, 不同林龄林地土壤蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性的变化范围分别为 25.93 ~ 71.07 Glucose mg/g, 0.15 ~ 0.52 NH₃ - N mg/g, 0.28 ~ 0.41 Phenol mg/g 和 3.95 ~ 4.58 mL 0.01 mol/L KMnO₄/g。相关性分析表明, 土壤有机质、全氮和速效磷含量与土壤蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性呈极显著的正相关性 ($P < 0.01$), 与过氧化氢酶呈极显著的负相关性 ($P < 0.01$)。【结论】华北落叶松的生长对土壤 pH、有机质、全氮、硝态氮、铵态氮和速效磷的变化产生了明显影响, 同时也影响了土壤酶活性; 由于该地区土壤的有效氮和速效磷含量较低, 加上林木的快速生长, 20 a 华北落叶松林地地力呈现衰退趋势。基于以上研究结果, 建议在该地区对于接近 20 a 的华北落叶松人工林地采取施肥措施, 以补充土壤养分, 保证林木的正常生长。

关键词: 华北落叶松; 林龄; 土壤养分; 土壤酶活性

中图分类号: S724.5

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2015)04-1032-08

Characteristics of soil nutrients and enzyme activities in young and middle aged *Larix principis-rupprechtii* plantation in western Qinling Mountains

WANG Wei-dong¹, WANG Wei-ling^{1*}, XU Fu-li^{2,3}, YU Qin-min², MA Hui-ling¹

(1 College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 College of Resources and Environmental Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Yangling, Shaanxi 712100, China)

收稿日期: 2014-01-06 接受日期: 2014-05-18 网络出版日期: 2015-05-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973 计划”(2012CB416902) 项目资助。

作者简介: 王伟东 (1988—), 男, 甘肃天水人, 硕士研究生, 主要从事植物生理生态方面的研究。E-mail: 315051046@qq.com

* 通信作者 E-mail: ylwwl@163.com

Abstract 【Objectives】 As one of the most important fast-growing afforestation tree species, *Larix principis-rupprechtii* has been introduced to Shaanxi Province fifty years ago. They grew well in early age, but with the age increased, the growth rate obviously slowed down. So, we studied the characteristics of soil nutrients and enzyme activities in young and middle aged *Larix principis-rupprechtii* plantation in western Qinling Mountains. 【Methods】 We chose three different aged *Larix principis-rupprechtii* (5 a, 10 a and 20 a) plantations in the Nantan Nursery Garden of Taibai in Shannxi Province as the experimental sites, and established 20 × 20 m plot in each age stand plantation in 2012. In each plot, soil samples were collected at three depths (0–20 cm, 20–40 cm, and 40–60 cm) in five randomly located points following “S”. Using these samples, we examined soil chemical properties (pH, organic matter, total N, ammonium N, nitrate N and available P) and enzyme activities (phosphatase, urease, invertase, and catalase) in the different age of plantations. 【Results】 With the soil depth increased, the soil pH values are increased in 5 years' plantations, but decreased first and then significantly increased ($P < 0.05$) in 10 and 20 years' plantations. The soil pH range from 6.09 to 6.71, in order of 10 a > 5 a > 20 a in 0–20 cm layer, and 5 a > 10 a > 20 a in 20–40 cm and 40–60 cm layers. The contents of soil organic matter in 0–20 cm layer range from 18.68 to 25.89 g/kg, significantly higher than in 20–40 cm and 40–60 cm layers, and keep constant as the planting age increased. There are significant reductions ($P < 0.05$) in soil total N, ammonium N, nitrate N and available P nutrients as the soil depth increased. In 0–20 cm layer, the contents of soil total N, ammonium N and nitrate N in 20 years' plantations are significantly higher ($P < 0.05$) than those in other-aged plantations. The soil available P in 10 years' plantations is highest. The activities of soil invertase, urease and phosphatase in 0–20 cm layer are significantly higher ($P < 0.05$) than those in 20–40 cm and 40–60 cm layers, while the soil catalase activities show an opposite tendency. In the 0–20 cm soil layer, the activities of soil invertase and urease in different years' plantation show as 10 a > 5 a > 20 a, the activities of soil phosphatase and catalase in 20 a-aged plantations are the highest, the variation ranges for these activities are as follows: invertase, 25.93–71.07 Glucose mg/g; urease, 0.15–0.52 NH₃-N mg/g; phosphatase, 0.28–0.41 Phenol mg/g and catalase 3.95–4.58 mL 0.01 mol/L KMnO₄/g. 【Conclusions】 The growth of *Larix principis-rupprechtii* affects the physicochemical and biological properties of soil. Because of the lack of soil available N and available P in this area and the rapid growth of plants, the fertility of plantations in the Qinling Mountains become worse when *Larix principis-rupprechtii* grow over 20 years. Accordingly, fertilizer should be applied in these plantations in order to avoid nutrient limitation for plant growth.

Key words: *Larix principis-rupprechtii*; stand age; soil nutrients; soil enzyme activity

华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* Mayr) 天然林主要分布在山西省管涔山、关帝山、五台山和恒山, 河北省雾灵山和小五台山海拔 1600 ~ 2500 m 的山地^[1]。由于生长迅速、树干通直、材质优良、繁殖容易、成活率高, 于是得到了生产上的重视。陕西省自 1958 年先后在秦岭和黄龙等林区进行了华北落叶松引种和造林, 引种初期生长良好, 而近年来生长势明显下降。这种速生丰产林导致地力衰退现象已引起普遍关注。南方的杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)^[2-4]、北方的落叶松 (*Larix gmelinii*)^[5-7] 人工林地力已得到系统研究。华北落叶松其生态适应性及生产力^[8]、养分循环^[9]、群落特征^[10]等方面的研究已有一些报道, 而对华北落叶松人工林土壤肥力退化机理的研究报道甚少。随着华北落叶松造

林面积的增加和中幼龄的陆续形成, 森林经营管理迫切关注华北落叶松林地土壤养分和土壤生物学特性变化问题^[11]。

土壤养分和土壤酶在森林生态系统的物质循环和能量流动方面发挥着关键的作用, 土壤养分含量直接影响着林木的生长, 土壤酶参与土壤中生物化学过程和物质循环, 对土壤有机质的转化起着重要的作用, 是反映森林土壤质量高低的重要生物学指标^[12-13]。土壤养分与土壤酶活性相结合可以全面地反映土壤生态系统退化的早期主要预警指标^[14-15]。本文以秦岭华北落叶松中幼龄人工林为研究对象, 通过分析中幼龄华北落叶松林地土壤养分和土壤酶活性的变化规律, 探讨在一定立地条件下不同中幼龄华北落叶松人工林土壤养分和土壤酶

活性的特征, 以期为分析和探讨华北落叶松幼龄期人工林的合理经营、中幼龄华北落叶松林地土壤生态系统结构、功能及其可持续性利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于秦岭西部太白县南滩苗圃林场。地理位置为东经 107°20′51.1″, 北纬 34°02′18.1″, 该区属于秦岭西主峰鳌山脚下, 海拔 1600 ~ 1700 m, 年均降水量 600 ~ 1000 mm, 年均无霜期 158 d, 年平均气温 7.6℃, 最高气温 32.8℃, 最低气温 -25.5℃, 属秦岭谷地小气候带, 林木生长期 166 d。林地土壤以山地黄棕壤为主, 土壤厚度为 65 cm 左右。林下生有绣线菊 (*Spiraea salicifolia*)、胡枝子

(*Lespedeza bicolor*)、六道木 (*Abelia biflora*) 等灌木, 草本植物主要有披针苔草 (*Arthraxon hispidus*)、大油芒 (*Sponiopogon sibiricus*)、黄精属 (*Polygonatum*)、菊科 (*Compositae*) 等多种植物。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 采用空间序列代替时间的方法, 在 2012 年 3 月全面实地调查并分析林分状况的基础上, 分别在林龄为幼龄 5 年 (5 a)、10 年 (10 a) 和中龄 20 年 (20 a) 的华北落叶松林中, 选择海拔、坡向、坡位等立地条件基本相同, 长势良好且较一致的林分, 分别选定 3 个 20 m × 20 m 的有代表性的样地。对样地乔木每木检尺, 并调查样地基本因子, 结果见表 1。

表 1 华北落叶松人工林样地基本因子

Table 1 General condition of *Larix principis-rupprechtii* sample plantation

样地 Plot	林龄 Age (a)	坡向 Slope aspect	坡度 (°) Slope degree	海拔 Elevation (m)	平均树高 Height (m)	平均胸径 (cm) Diameter at breast height	密度 Density (棵)	林下草本类型 Under growth vegetation
I	5	NE	20 ~ 25	1680	4.8	4.46	2800	黄精属 (<i>Polygonatum</i>)、 菊科 (<i>Compositae</i>) 等为主
II	10	NE	20 ~ 25	1650	8.6	7.32	2750	大油芒 (<i>Sponiopogon sibiricus</i>) 为主
III	20	NW	10 ~ 15	1675	10.2	10.23	2500	披针苔草 (<i>Arthraxon hispidus</i>)

1.2.2 土样采集 在试验地 20 m × 20 m 的样方内按 W 型选取 5 个小区域, 在每个小区域内用 1 m 土钻分别采集 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 土样, 重复取 3 次, 将所采集的 3 个重复土样按不同土层充分混匀, 再利用四分法取 1 kg 左右, 最终每个林龄样地每个土层取得 5 个土壤样品, 3 层共 15 个土壤样品带回实验室风干、磨细, 分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛, 保存于密封袋中备用。

1.2.3 测定项目与方法 土壤有机质用重铬酸钾氧化—外加加热法; 全氮用硒粉—硫酸铜—硫酸消化法测定; 铵态氮、硝态氮用 AA3 型连续流动分析仪测定; 有效磷用钼锑抗比色法测定; 土壤 pH 用电位法测定。蔗糖酶活性测定用 3,5-二硝基水杨酸比色法, 以 1 g 土在 37℃ 培养 24 h 分解蔗糖产生的葡萄糖的毫克数表示; 脲酶活性的测定用靛酚比色法, 以 1 g 土在 37℃ 培养 24 h 后土壤中 NH₃-N 的毫克数表示; 磷酸酶活性的测定用磷酸苯二钠比色法, 以 1 g 土在 37℃ 培养 2 h 后土壤中释放的酚的毫克数表示; 过氧化氢酶活性的测定用 KMnO₄ 滴定法, 以 1 g

土壤 20 min 后消耗的 0.01 mol/L 的 KMnO₄ 的体积表示^[16]。

试验数据应用 Excel 2010 和 SPSS20.0 软件进行分析, 单因素方差 (one-way ANOVA) 检验处理之间的差异, 进行 Person 相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同林龄华北落叶松人工林土壤 pH、有机质和氮、磷养分的变化特征

由表 2 可知 20 a 林龄土壤 pH 显著低于 5 a 和 10 a 林龄, 表现出随着林龄的增加土壤 pH 呈降低的趋势。0—20 cm 土层土壤中有有机质和氮、磷养分含量均高于 20—40 cm 和 40—60 cm 土层, 表现出土壤有机质和养分含量随土层深度的增加而降低的趋势。方差分析结果显示, 3 种不同林龄间表层 (0—20 cm) 土壤有机质有极显著差异且为 20 a > 10 a > 5 a; 5 a 和 10 a 林龄 20—40 cm 土层土壤的有机质含量显著高于 20 a, 而 5 a 比 10 a 林龄的土

表 2 不同林龄华北落叶松林地土壤 pH、有机质和养分分布的变化

Table 2 Distribution and changes of soil pH, organic matter and nutrients at different ages *Larix principis-rupprechtii*

项目 Item	土层深度(cm) Depth	林龄 Age(a)			F 值 F value
		5	10	20	
pH	0—20	6.51 bB	6.71 aA	6.21 cA	286.19**
	20—40	6.60 aA	6.39 bB	6.09 cB	236.15**
	40—60	6.65 aA	6.65 aA	6.26 bA	90.45*
	F 值 F value	19.73*	92.45*	16.05*	
有机质 Organic matter (g/kg)	0—20	18.68 cA	20.36 bA	25.89 aA	272.43**
	20—40	12.66 aB	12.17 aB	7.21 bB	35.89**
	40—60	7.76 bC	10.90 aC	4.45 cC	344.16**
	F 值 F value	244.34**	213.60**	1381.39**	
全氮 Total N (g/kg)	0—20	1.17 cA	1.22 bA	1.43 aA	161.59**
	20—40	0.83 abB	0.80 bB	0.85 aB	7.84*
	40—60	0.60 aC	0.63 aC	0.46 bC	49.17**
	F 值 F value	3245.55**	375.71**	2556.42**	
铵态氮 Ammonium nitrogen (mg/kg)	0—20	5.29 cA	6.47 bA	7.50 aA	21.66**
	20—40	3.91 aB	3.80 aB	4.47 aB	2.11
	40—60	3.66 aB	3.99 aB	4.29 aB	0.62
	F 值 F value	61.14**	67.00**	13.88**	
硝态氮 Nitrate nitrogen (mg/kg)	0—20	29.41 bA	21.35 cA	49.86 aA	79.65**
	20—40	17.92 aB	14.78 aB	5.91 bB	20.17**
	40—60	11.85 aC	8.14 aC	3.86 bC	13.85**
	F 值 F value	27.42**	16.46**	2782.12**	
有效磷 Available P (mg/kg)	0—20	5.40 aA	5.89 aA	4.73 bA	11.52**
	20—40	3.95 aB	5.07 aB	3.61 aB	8.03*
	40—60	3.33 abB	4.48 aC	2.99 bB	8.73*
	F 值 F value	38.86**	27.94**	27.08**	

注(Note): 同行数据后不同小写字母表示同一土层不同林龄间差异达 5% 显著水平 Values followed by different lowercase letters within the same row are significant for the same soil depth among different age at the 5% level; 同列数据后不同大写字母表示同一林龄不同土层间的差异达 5% 显著水平 Values followed by different capital letters in same column are significant for the same age among different soil depths at the 5% level. * — $P < 0.05$; ** — $P < 0.01$.

壤有机质含量高,但差异不显著;10 a 林龄 40—60 cm 土层土壤的有机质显著含量高于 5 a 5 a 则显著高于 20 a。随着土壤深度的增加,土壤有机质降低的幅度 20 a 林龄的最大,从 0—20 cm 的 25.89 g/kg 下降到 40—60 cm 的 4.45 g/kg;10 a 的最小,从 0—20 m 的 20.36 g/kg 下降到 40—60 cm 的 10.90 (g/kg)。土壤全氮、铵态氮和硝态氮随土层深度的增

加表现出降低的趋势。在土壤表层(0—20 cm)全氮、铵态氮和硝态氮均表现为随林龄的增加而显著增加;下层土壤(20—40 cm 和 40—60 cm)表现出随林龄增加而维持稳定不变甚至降低的趋势。土壤有效磷随土壤深度的增加而降低,不同林龄的土壤有效磷有降低的趋势,与土壤 pH 的变化规律一致。

2.2 不同林龄华北落叶松林地土壤酶活性的变化

特征

表 3 显示 0—20 cm 表层土壤的蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性均显著高于 20—40 cm 和 40—60 cm 土层,表明蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性有随土层深度的增加而呈降低的趋势,其中 5 a 林龄的 0—20 cm 土层土壤的蔗糖酶活性约是 40—60 cm 的 5 倍,脲

酶活性 0—20 cm 是 40—60 cm 土层的 5 倍左右,磷酸酶活性 0—20 cm 是 40—60 cm 的 4 倍。这一变化趋势与土壤有机质及氮、磷养分含量的变化趋势一致。而 0—20 cm 土层的过氧化氢酶活性比 20—40 cm 和 40—60 cm 土层中的低,表明过氧化氢酶的活性有随土层深度的增加而增加的趋势。

表 3 不同林龄华北落叶松林地土壤酶活性特征

Table 3 Distribution characteristics of soil enzymes in different ages of *Larix principis-rupprechtii*

土壤酶 Soil enzyme	土层深度 (cm) Depth	林龄 Age (a)			F 值 F value
		5	10	20	
蔗糖酶 Invertase [Glucose mg/(g·24 h)]	0—20	64.36 aA	71.07 aA	25.93 bA	213.15**
	20—40	50.64 aB	59.00 aB	17.28 bB	154.64**
	40—60	13.01 bC	21.87 aC	1.20 cC	435.53**
	F 值 F value	311.22**	459.44**	75.14**	
脲酶 Urease [NH ₃ -N mg/(g·24 h)]	0—20	0.34 bA	0.52 aA	0.15 cA	123.65**
	20—40	0.16 aB	0.18 aB	0.04 bB	19.17*
	40—60	0.06 bC	0.13 aB	0.02 cB	114.07**
	F 值 F value	54.83**	279.69**	81.60**	
磷酸酶 Phosphatase [Phenol mg/(g·24 h)]	0—20	0.28 bA	0.35 aA	0.41 aA	19.00*
	20—40	0.12 bB	0.12 bB	0.17 aB	17.21*
	40—60	0.07 aC	0.07 aC	0.07 aC	0.70
	F 值 F value	1064.52**	2239.65**	124.43**	
过氧化氢酶 Catalase [0.01 mol/L KMnO ₄ mL/(g·20 min)]	0—20	4.51 aB	3.95 bB	4.58 aB	33.09**
	20—40	4.80 bA	4.36 cB	5.43 aA	43.80**
	40—60	4.80 bA	4.80 bA	5.30 aA	21.33**
	F 值 F value	9.00	18.86*	127.40**	

注(Note): 同行数据后不同小写字母表示同一土层不同林龄间差异达 5% 显著水平 Values followed by different lowercase letters within the same row mean significant for the same soil depth among different age at the 5% level; 同列数据后不同大写字母表示同一林龄不同土层间的差异达 5% 显著水平 Values followed by different capital letters in same column mean significant for the same age among different soil depth at the 5% level.
* — $P < 0.05$; ** — $P < 0.01$.

方差分析表明,不同林龄华北落叶松林地土壤酶活性在各林龄间有显著差异。其中蔗糖酶和脲酶活性的变化规律基本一致,均为 10 a > 5 a > 20 a。磷酸酶在 0—20 cm 表层土壤中表现随林龄的增加而增加,在 20—40 cm 和 40—60 cm 土层磷酸酶活性的变化差异不明显。过氧化氢酶活性的变化规律为 20 a > 5 a > 10 a。

3 讨论与结论

3.1 不同林龄对华北落叶松林地土壤 pH、有机质和氮、磷养分含量的影响

土壤酸碱性是衡量土壤性质的重要指标之一,对土壤的性状有较大的影响,也会影响林木的生长发育、微生物的活动、土壤营养元素的释放转化、有机质的分解以及元素的迁移等^[17]。本研究表明,随

着华北落叶松人工林林龄的增加,土壤有酸化的趋势,其中下层土壤酸化的趋势比较明显。这一结果与刘勇对幼、中林龄华北落叶松林地土壤的研究^[11]、卢鑫等对不同林龄紫穗槐研究的结果一致^[18]。其原因是由于林地内物种过于单一,土壤表层的枯枝落叶以针叶为主,这些凋落物在长期的分解过程中产生大量的单宁、有机酸等酸性物质,从而导致林地土壤酸化。

华北落叶松人工林地林木生长主要靠土壤自然肥力。土壤为林木生长提供养分,相对应的林木在生长发育过程中通过凋落物和根系分泌物的形式补给并影响林地土壤的肥力^[19]。本研究表明,土壤剖面有机质、氮含量随土壤深度的增加而降低,这一结果与前人的研究结果一致^[20]。这是由于落叶松凋落物主要堆积在表层土壤,有利于土壤肥力增加。

土壤有机质、氮、磷养分受到土壤利用、森林管理、林地坡度、光照以及林下植被等多种因素的综合影响^[21]。本研究表明在林地0—20 cm土壤表层有机质、全氮、铵态氮、硝态氮均随着林龄的增加而增加,这和张超等对不同林龄的刺槐的研究结果一致^[22],而在20—40 cm和40—60 cm下层土壤中有有机质、全氮、铵态氮和硝态氮呈现不变甚至下降的趋势。造成这种结果的原因有可能为:其一,在造林初期,土壤处于恢复期,树木通过凋落物等形式返还的有机质量少,因此有机质含量较低,随着林分的生长发育,植物残余物量增加,土壤有机质含量增加^[23];其二,落叶松在幼林期生长迅速,更多的是营养生长。随着林龄的增大,20年生的华北落叶松的凋落物积累量远远大于5年生和10年生的积累量,这些凋落物补充了表层土壤的养分。华北落叶松生长过程中也会从20—60 cm土壤层以及更深的土层中吸收养分,而20—60 cm土层的被吸收的养分不能通过凋落物的形式得到及时的补充或者补充量很少,所以导致养分含量降低。

土壤中有效磷含量与有机质和氮的变化不同^[24]。速效磷含量从10 a开始到20 a显著下降,这与周德明等对杉木的研究^[4]及赵琼等^[25]对沙地樟子松人工林研究结果一致,原因是树木所吸收的磷来自于根际,而凋落物回馈的磷多聚集在土壤表层,造成了根际土壤内速效磷亏缺,随着华北落叶松林龄的增加,根际土壤速效磷降低的趋势。

3.2 不同林龄对华北落叶松林地土壤酶的影响

土壤酶主要来自土壤微生物、植物根系分泌物和动植物残体的腐化^[16]。土壤酶在土壤生态系统

的物质循环和能量转化中起着非常重要的作用,是土壤质量变化中比较敏感的一种生物学指标^[26]。已有研究表明林龄对土壤表层的酶活性影响较为显著^[27-28]。本研究结果表明,在不同土壤剖面中土壤酶的变化趋势为上层(0—20 cm)明显高于下层(20—40 cm和40—60 cm),并且随着土层的加深而降低,层次之间变化明显,这主要是由于土壤表层有机质含量高,有充分的营养源以利于微生物的生长,加之表层水热条件和通气状况良好,微生物生长旺盛,代谢活跃,呼吸强度加大而使表层的土壤酶活性较高。

林龄通过对土壤理化性质、生物区系和土壤水热状况的改变,间接地影响土壤酶活性^[29]。对不同土壤剖面 and 不同林龄研究的结果分析,不同林龄的蔗糖酶和脲酶活性的变化趋势是5 a到10 a升高,从10 a到20 a迅速的下降,这一结果与刘勇^[11]在幼、中林龄的华北落叶松上的研究及吕春花等^[30]的研究结果相一致;磷酸酶在土壤表层是随着林龄的增大而增大,这与张超等的研究结果一致^[22],在土壤深层,不同林龄的土壤磷酸酶变化差异不明显,其原因可能是表层土壤的腐殖质含量高影响土壤磷酸酶的活性。本研究中过氧化氢酶活性在不同林龄间的差异不明显,与过氧化氢酶活性受影响的因素众多有关。

土壤是林木生长的重要基质,为林木的生长提供必需的养分,直接影响林木的生长发育。同时,凋落物作为森林生态系统物质循环过程中的一个重要物质库,储存了大量的养分物质,是森林土壤自然肥力的重要来源^[31-32]。华北落叶松作为一种落叶乔木,在每年的生长末期通过落叶将大量的养分归还到土壤之中,使得有限的养分元素不断地被林木循环利用,既保持了土壤肥力,又维护了生态系统的平衡。由于林地浅层土壤更接近凋落物等形成腐殖质层,所以林地浅层土壤的肥力比深层更丰富。试验结果显示,表层土壤(0—20 cm)的养分含量和土壤酶活性比下层土壤(20—40 cm和40—60 cm)更高。林木在整个生长发育过程中,也能通过根系分泌物等影响土壤的理化性质,进而影响其生长发育^[33-34]。林木初级生产量的变化和土壤表层土的再分配影响林地养分的变化^[35]。所以随着华北落叶松林木的生长发育,其土壤肥力受到影响。

华北落叶松的生长对土壤pH、有机质、全氮、硝态氮、铵态氮和有效磷的变化产生了明显影响,同时也影响了土壤酶活性。具体结果表现为:1) 20 a华

北落叶松林地土壤与 5 a 和 10 a 相比,有酸化的趋势; 2) 土壤有机质、全氮、硝态氮含量在表层(0—20 cm) 有升高的趋势,但是在下层土壤中急剧下降,总体也呈下降趋势; 3) 20 a 林地土壤中有效磷含量、蔗糖酶、脲酶活性均显著低于 5 a 和 10 a; 4) 综合土壤 pH、养分含量和土壤酶活性, 20 a 华北落叶松林地力呈现衰退趋势。针对这种现象,在华北落叶松人工林的经营过程中,对于林地土壤衰退的现象可以通过营养调控措施(如施肥等)来改善。

参考文献:

- [1] 雷瑞德,党坤良,张硕新,等. 秦岭南坡中山地带华北落叶松人工林对土壤的影响[J]. 林业科学, 1997, 33(5): 463-470.
Lei R D, Dang K L, Zhang S X *et al.* Effect of *Larix principis-rupprechtii* forest plantation on soil in middle zone of south-facing slope of Qinling Mountains[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1997, 33(5): 463-470.
- [2] 张建国,盛炜彤,熊有强,等. 施肥对盆栽杉木苗土壤养分含量的影响[J]. 林业科学, 2006, 42(4): 43-50.
Zhang J G, Sheng W T, Xiong Y Q *et al.* Effect of fertilization on soil nutrient content of potted Chinese fir seedling[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(4): 43-50.
- [3] 盛炜彤. 杉木林的密度管理与长期生产力研究[J]. 林业科学, 2001, 37(5): 2-9.
Sheng W T. A study on stand density management and long-term productive of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(5): 2-9.
- [4] 周德明, 马玉莹, 梅杰. 不同林龄杉木林地土壤特性分析[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 353-356.
Zhou D M, Ma Y Y, Mei J. Soil properties analysis under different ages of Chinese fir[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(4): 353-356.
- [5] 杨会侠,汪思龙,范冰,等. 不同林龄马尾松人工林凋落物量与养分归还动态[J]. 生态学杂志, 2010, 29(12): 2334-2340.
Yang H X, Wang S L, Fan B *et al.* Dynamics of annual litter mass and nutrient return of different age Masson pine plantations[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(12): 2334-2340.
- [6] 梅杰,周国英. 不同林龄马尾松根际与非根际土壤微生物、酶活性及养分特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(4): 46-49.
Mei J, Zhou G Y. Study of rhizosphere and non-rhizosphere microbial, enzyme activity and nutrients element content of soil in different stand ages *Pinus massoniana* forest[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2011, 31(4): 46-49.
- [7] 程云环,韩有志,王庆成,等. 落叶松人工林细根动态与土壤资源有效性关系研究[J]. 植物生态学报, 2005, 29(3): 403-410.
Cheng Y H, Han Y Z, Wang Q C *et al.* Seasonal dynamics of fine root biomass, root length density, specific root length and soil resource availability in a *Larix gmelini* plantation[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2005, 29(3): 403-410.
- [8] 李建国,陈国海,贺庆堂,等. 华北落叶松生态适应性的定量分析与评价[J]. 生态学报, 1996, 02: 180-186.
Li J G, Chen G H, He Q T *et al.* Quantitative analysis and evaluation of *Larix prince Rupprechtii*'s ecological adaptation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 02: 180-186.
- [9] 谢会成,杨茂生. 华北落叶松人工林营养元素的生物循环[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2002, 26(5): 49-52.
Xie H C, Yang M S. The biocycle of *Larix principis-rupprechtii* forest plantation in south slope of Qinling Mountains[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2002, 26(5): 49-52.
- [10] 侯庸,王桂青,张良. 华北落叶松群落与土壤肥力的关系[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2001, 21(3): 315-320.
Hou Y, Wang G Q, Zhang L. Relationship between soil fertilities and *Larix principis-rupprechtii* communities in successional stages[J]. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, 2001, 21(3): 315-320.
- [11] 刘勇,李国雷,林平,等. 华北落叶松人工林幼、中林龄土壤肥力变化[J]. 北京林业大学学报(自然科学版), 2009, 31(3): 17-23.
Liu Y, Li G L, Lin P *et al.* Changes of soil fertility in young and middle aged *Larix principis-rupprechtii* plantations[J]. *Journal of Beijing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2009, 31(3): 17-23.
- [12] Carine F, Yuan C, Steven C. Enzyme activities in apple orchard agroecosystem: How are they affected by management strategy and soil properties[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(1): 61-68.
- [13] An S S, Huang Y M, Zheng F. Evaluation of soil microbial indices along a revegetation chronosequence in grassland soil on the loess plateau Northwest China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41(3): 286-292.
- [14] 向泽宇,王长庭,宋文彪,等. 草地生态系统土壤酶活性研究进展[J]. 草业科学, 2011, 28(10): 1801-1806.
Xiang Z Y, Wang C T, Song W B *et al.* Advances on soil enzymatic activities in grassland ecosystem[J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(10): 1801-1806.
- [15] 徐华勤,张家恩,冯丽. 广东省典型土壤类型和土地利用方式对土壤酶活性的影响[J]. 植营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1464-1471.
Xu H Q, Zhang J E, Feng L. Effect of typical soil types and land use patterns on soil enzyme activities in Guangdong province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1464-1471.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
Guan S Y. Soil enzyme and its study method[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [17] 戴开结,浓有信,周文君. 云南松根际 pH 与不同磷水平下

- 云南松幼苗根际 pH 变化[J]. 西北植物学报, 2005, 25(12): 2490-2494.
- Dai K J, Nong Y X, Zhou W J. Rhizosphere pH of *Pinus yunnanensis* Franch. and rhizosphere pH of *P. yunnanensis* seedlings at different phosphorous rates[J]. Acta Botanica Boreali - Occidentalia Sinica, 2005, 25(12): 2490-2494.
- [18] 卢鑫, 周向睿, 杜明新, 等. 不同林龄紫穗槐对沙地土壤的改良效应[J]. 草业科学, 2013, 30(7): 994-1001.
- Lu X, Zhou X R, Du M X et al. Effects of *Amorpha fruticosa* on soil physical composition and nutrient content[J]. Pratacultural Science, 2013, 30(7): 994-1001.
- [19] 温远光, 元昌安, 李信贤, 等. 大明山中山植被恢复过程植物物种多样性的变化[J]. 植物生态学报, 1998, 22(1): 33-40.
- Wen Y G, Yuan C A, Li X X et al. Development of species diversity in vegetation restoration process in mid - mountain region of Damingshan, Guanxi [J]. Journal of Plant Ecology, 1998, 22(1): 33-40.
- [20] 杨成德, 龙瑞军, 陈秀荣, 等. 东祁连山高寒灌丛草地土壤微生物量及土壤酶季节性动态变化特征[J]. 草业学报, 2011, 20(6): 135-142.
- Yang C D, Long R J, Chen X R et al. Seasonal dynamics in soil microbial biomass and enzymatic activities under different alpine brushlands of the Eastern Qilian Mountains [J]. Pratacultural Science, 2011, 20(6): 135-142.
- [21] Jia G M, Cao J, Wang C Y, Wang G. . Microbial biomass and nutrients in soil at different stages of secondary forest succession in Ziwulin, Northwest China [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 217: 117-125.
- [22] 张超, 刘国彬, 薛蕙, 等. 黄土丘陵区不同林龄人工刺槐林土壤酶演变特征[J]. 林业科学, 2010, 46(12): 23-29.
- Zhang C, Liu G B, Xue S et al. Evolution of soil enzyme activities of *Robinia pseudoacacia* plantation at different ages in loess hilly region[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(12): 23-29.
- [23] Trouvé C, Mariotti A. Soil organic carbon dynamics under Eucalyptus and *Pinus* planted on savannas in the Congo[J]. Soil and Biochemistry, 1994, 26: 287-295
- [24] 王玉娟, 何小三, 龚春, 等. 油茶成林林地土壤养分含量变化规律[J]. 经济林研究, 2010, 6(2): 55-58.
- Wang Y J, He X S, Gong C et al. Change regulation of nutrient contents in *Camellia oleifera* forest soil [J]. Nonwood Forest Research, 2010, 6(2): 55-58.
- [25] 赵琼, 曾德慧, 陈伏生, 等. 沙地樟子松人工林土壤磷库及其有效性初步研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 224-227.
- Zhao Q, Zeng D H, Chen F S et al. Soil phosphorus pools and availability on *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 224-227.
- [26] 周玮, 周运超. 北盘江喀斯特峡谷不同植被类型酶活性[J]. 林业科学, 2010, 46(1): 136-141.
- Zhou W, Zhou Y C. Soil enzyme activities under different vegetation types in Beipan River Karst gorge district[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(1): 136-141.
- [27] 张昌顺, 范少辉, 谢高地. 闽北典型毛竹林土壤酶活性及其与土壤肥力的关系[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 62-74.
- Zhang C S, Fan S H, Xie G D. Research on soil enzyme activities and its relations with soil fertility under typical bamboo (*Phyllostachys edulis*) plantation in Northern Fujian province [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(2): 62-74.
- [28] 隋跃宇, 焦晓光, 高崇生, 等. 土壤有机质含量与土壤微生物及土壤酶活性关系的研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1036-1039.
- Sui Y Y, Jiao X G, Gao C S et al. The relationship among organic matter content and soil microbial biomass and soil enzyme activities [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(5): 1036-1039.
- [29] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等. 三峡库区不同林龄马尾松土壤养分和酶活性关系研究[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 445-451.
- Ge X G, Xiao W F, Zeng L X et al. Relationships between soil nutrient contents and soil enzyme activities in *Pinus massoniana* stand with different ages in Three Gorges Reservoir Area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(2): 445-451.
- [30] 吕春花, 郑粉莉, 安韶山. 子午岭地区植被演替过程中土壤养分及酶活性特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 227-232.
- Lü C H, Zheng F L, An S S. The characteristics of soil enzyme activities and nutrient during vegetation succession [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(2): 227-232.
- [31] 曾曙才, 苏志尧, 古炎坤, 等. 广州白云山风景区主要林分类型凋落物的研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 154-156.
- Zeng S C, Su Z Y, Gu Y K et al. Litterfalls of major forest stands at Baiyunshan scenic spot of Guangzhou [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(1): 154-156.
- [32] 杨玉盛, 林鹏, 郭剑芬. 格氏栲天然林与人工凋落物数量、养分归还及凋落叶分解[J]. 生态学报, 2003, 23(7): 1278-1289.
- Yang Y S, Lin P, Guo J F. Litter production, nutrient return and leaf - litter decomposition in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(7): 1278-1289.
- [33] Rastetter E B, Rgan M G, Shaver G R et al. A general biochemistry model describing the responses of the C and N cycles in terrestrial ecosystems to changes in CO₂, climate and N deposition[J]. Tree Physiology, 1991, 9: 101-126.
- [34] Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M et al. Potential net primary productivity in South America: Application of a global model[J]. Ecological Applications, 1991, 1: 399-429.
- [35] Carlyle J C, Malcolm D C. Nitrogen availability beneath pure spruce and mixed larch + spruce stands growing on a deep peat [J]. Plant and Soil, 1986, 93: 95-113.