

不同年龄杉木林 MB-P 的调控因子

邓飘云^{1,7}, 周运超¹, 闫文德^{2,3,4}, 谌小勇^{2,3,5}, 刘明礼⁶, 曹娟², 刘启波⁸

(1. 贵州大学 林学院, 贵阳 550025; 2. 中南林业科技大学 生命科学与技术学院, 长沙 410004;

3. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004; 4. 湖南会同杉木林生态系统国家重点野外科学观测研究站,

湖南 会同 418307; 5. 美国州长州立大学, 伊利诺伊州 60484; 6. 贵州省林业调查规划院, 贵阳 550003;

7. 贵州森林资源资产评估有限公司, 贵阳 550003; 8. 中南大学 地球科学与物理信息学院, 长沙 410083)

摘要:选取会同县不同林龄(3 年生、8 年生、18 年生、26 年生)杉木人工林为研究对象,测定其土壤全磷(TP)、有效磷(Bray 1-P)、微生物量磷(MB-P)、无机磷和有机磷组分,利用逐步回归分析和通径分析揭示各土壤磷因子和理化因子对 MB-P 影响较大的优势因子。结果显示:(1) 4 种不同林龄杉木林土壤 MB-P 含量的平均值为 6.90 mg/kg。TP 和 Bray 1-P 含量的平均值分别为 320.71 mg/kg, 1.77 mg/kg, 均属低水平。(2) 不同林龄各因子对 MB-P 的影响:3 年生林, Bray 1-P, Al-P 对 MB-P 的影响较大;8 年生林, N/P, LO-P、土壤含水率(W)、MRO-P 对 MB-P 影响突出;18 年生林, Fe-P, N/P, Al-P, Bray 1-P 对 MB-P 的作用明显;26 年生林, Fe-P, TP 对 MB-P 的影响较大, Ca-P, pH, P%, MLO-P 直接或间接地对 MB-P 产生较大影响。综上,不同林龄各因子对 MB-P 的影响程度不同。

关键词:通径分析; 微生物量磷; 速效磷; 无机磷; 有机磷

中图分类号:S714.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)01-0260-06

Control Factors of Soil Microbial Biomass Phosphorus in Stands of Chinese Fir Plantations With Different Ages in Huitong, Hunan Province

DENG Piaoyun^{1,7}, ZHOU Yunchao¹, YAN Wende^{2,3,4},
CHEN Xiaoyong^{2,3,5}, LIU Mingli⁶, CAO Juan², LIU Qibo⁸

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 3. National Engineering Lab for Applied Technology of Forestry & Ecology in South China, Changsha 410004, China; 4. National Key Station for Field Scientific Observation & Experiment, Huitong, Hunan 418307, China; 5. Governors State University, Illinois 60484, USA; 6. Guizhou Forestry Survey and Planning Institute, Guiyang 550003, China; 7. Guizhou Forest Resources Assets Appraisal Limited Company, Guiyang 550003, China; 8. College of Earth Sciences and physical information, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Changes in total P, Bray 1-P, microbial biomass P, inorganic P and organic P fractions in soils were investigated in four aged Chinese fir plantation forests (3, 8, 18 and 26-year-old stands) in Huitong, Hunan Province, China. Stepwise regression analysis and path analysis were used to reveal the dominant factors affecting soil microbial biomass P from phosphorus factors and soil physical and chemical properties. The results showed that: (1) the average value of the microbial biomass P content was 6.90 mg/kg in the four examined aged stands. the average concentrations of total P and Bray 1-P were 320.71 mg/kg, 1.77 mg/kg, respectively, but they were all at the low levels; (2) the influence of factors on MB-P in four aged Chinese fir plantation forests: In 3-year-old stand, Bray 1-P, Al-P were significantly positively correlated with MB-P; in 8-year-old stand, N/P, LO-P, soil water, and MRO-P were positively correlated with MB-P; in 18-year-old stand, Fe-P, N/P, Al-P, Bray 1-P were positively correlated with MB-P; in 26-year-old stand, Fe-P, TP were positively correlated with MB-P. In conclusion, different factors of stands with different ages had different influence on MB-P.

收稿日期: 2018-01-07

修回日期: 2018-02-01

资助项目: 国家林业公益性行业科研专项(201404316); 湖南省科技重点研发计划项目(农业支撑领域)(2015NK3025)

第一作者: 邓飘云(1989—), 女, 湖南邵阳人, 博士研究生, 主要从事森林培育与森林资源资产评估工作。E-mail: dengpiaoyun@163.com

通信作者: 刘明礼(1964—), 男, 贵州贵阳人, 学士, 高级工程师, 主要从事林业调查规划设计工作。E-mail: 330350851@qq.com

Keywords: path analysis; microbial biomass P; Bray 1-P; inorganic phosphorus fraction; organic phosphorus fraction

磷元素对植物的生长发育至关重要,但磷很容易被土壤大量吸附和固定,导致土壤中可溶性磷含量很低,常被认为是林地重要的限制性养分。微生物是土壤有机磷转为有效磷的重要枢纽,对调控土壤磷的植物有效性及循环转化起着重要作用^[1]。土壤中的微生物量磷(Microbial Biomass Phosphorus,简称 MB-P)是土壤中体积<5 000 μm³的所有活体微生物所含有的磷素的总和^[2],它对土壤环境反映灵敏,常被用于衡量土壤肥力和作物生产力的一个重要指标。

杉木是我国南方地区最主要的造林树种之一,由于各种不合理经营和管理,杉木人工林地力日渐衰退^[3]。近年来,对杉木林的研究主要集中在凋落物及其分解、养分内循环与周转利用率、土壤碳储量与归还^[4-6]等方面。在微生物量研究方面,对微生物量碳、氮研究较多^[7],但针对不同林龄杉木林土壤磷素变化特征及其对 MB-P 影响的研究鲜有报道。本研究以湖南会同立地条件基本一致的不同林龄杉木林为研究对象,探讨不同林龄杉木人工林土壤磷素形态及其对 MB-P 的贡献,以及土壤环境因子与 MB-P 的关系,为研究不同林龄杉木林土壤磷素动态及其变化规律提供基础数据,为了解各土壤磷组分对土壤 MB-P 的相对作用,及揭示其主要控制性因子提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验地概况

研究样地位于湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站(109°45'E,26°50'N),海拔 200~500 m,属于亚热带湿润性气候,四季分明,年平均气温 16.8℃,年降水量为 1 000~1 500 mm,年平均相对湿度为 80%以上。地貌类型为低山丘陵,土壤主要以震旦纪板溪系变质页岩和砂岩发育成的中有机

质厚层黄壤,pH 值在 4.9~5.1,适宜的气候、土壤、地形、岩性等为杉木的生长创造有利条件。本试验选取 3 a 生、8 a 生、18 a 生和 26 a 生 4 个年龄的杉木林分建立标准样地,4 种杉木林分样地土壤类型、立地条件一致,每块样地面积为 20 m×20 m,每个年龄设置 3 个重复,共 12 块样地。4 个年龄杉木林均是炼山后用实生苗进行的全垦造林,造林密度 2 500 株/hm²,造林后的 3 a 内每年进行 2 次(6 月、11 月)全林抚育,抚育期后任其自然生长。林下灌木主要是杜茎山(*Maesa japonica*)、菝葜(*Smilax japonica china*)、木姜子(*Litsea pungens*)、冬青(*Ilex chinensis*)和油桐(*Vernicia fordii*),还有铁芒萁(*Dieranopteris linear*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)、地念(*Melastoma dodecandrum*)和华南毛蕨(*Cyclosorus parasicus*)等草本植物。林分的基本特征如表 1 所示。

1.2 土样采集和测定方法

1.2.1 土壤样品的采集 于 2015 年 6 月采样。在 4 个林龄的每块样地内,按照“随机”、“等量”的原则,分别沿上、中、下坡,随机设置 3 个采样点。连续天晴一周后,用土钻按 0—20 cm,20—40 cm 和 40—60 cm 分层采集土壤样品,采集时移去地表枯枝落叶,取土深度及采样量均匀一致,每块样地 3 个采样点各土层的土样约 1 kg,放入无菌塑料袋,共 27×4=108 袋,去掉杂质,并测定样地各层土壤容重。采用对角线法取 300~400 g 经室内通风处自然风干后的土样,用木棍碾压并过 2 mm 孔径筛的土样,用于测定有效磷(Bray 1-P)、有机磷,然后从 2 mm 的土壤样品中取 200 g 左右磨细全部过 0.149 mm 筛,用于全磷(TP)、无机磷的测定。用相同的方法,另取 108 袋鲜土带回实验室,放在 4℃的冰箱中保存,用于 MB-P 的测定。每个土壤样品做 2 个平行样,误差<5%。

表 1 各样地的林分特征和土壤理化性质

林龄/ a	林分密度/ (株·hm ⁻²)	郁闭度/ %	平均 胸径/cm	平均 树高/m	pH	总孔 隙度/%	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	含水率/ %	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)
3	2500	30	3.7	2.8	4.73	47.31	1.41	21.13	12.61	1.32
8	2440	70	6.7	5.6	4.92	51.97	1.27	23.00	14.58	1.38
18	1825	100	13.8	14.2	4.95	52.60	1.25	22.75	13.44	1.72
26	1917	90	17.1	16.0	4.87	50.43	1.32	24.88	14.09	1.61

1.2.2 土壤指标的测定 土壤 TP:碱熔—钼锑抗比色法^[8];土壤 Bray 1-P:氟化铵—盐酸浸提法^[8];土壤无机磷形态分级测定:张敬守和 Jackson 提出的分

级方法^[9];土壤有机磷的分组测定:采用 Bowman-Cole 法^[10];土壤无机磷、有机磷含量之和为 TP 含量。土壤 MB-P:采用吴金水等^[11]提出的氯仿熏蒸

法。土壤含水率(W):采用烘干法((105±2)℃,12 h)^[12];土壤总孔隙度(P%):查询赵洪书根据容重计算得到的《总孔隙度查对表》^[13]。土壤全氮(TN):半微量凯氏定氮法;土壤有机碳(SOC):重铬酸钾氧化—外加热法测定;pH:电位法。

1.3 统计分析方法

原始数据的整理、图表的制作采用 Excel 2007 软件,数据的逐步回归分析、相关分析、方差分析、通径分析采用 SPSS 18.0 软件。

2 结果与分析

2.1 林地土壤全磷及其构成

杉木人工林 3 a 林土壤 TP 最低,0—60 cm 土层 TP 分别比 8 a 林、18 a 林、26 a 林低 38.7%,41.7%,39.0%,而后三者 TP 差异不明显(表 2)。不同土层 TP 含量皆表现为表层(0—20 cm)高于中、底层。土壤无机磷。土壤无机磷包括铝磷(Al-P)、铁磷(Fe-P)、闭蓄态磷(O-P)、钙磷(Ca-P),4 种林龄林分的土壤无机磷均以 O-P 含量最高(占无机磷总量的 62.8%~67.4%),Fe-P 其次(占无机磷总量的 14.4%~19.6%),Ca-P 第三(占无机磷总量的 9.1%~11.3%),Al-P 最低(占无机磷总量的 5.6%~7.2%)。从土壤垂直分布上,Al-P,Fe-P 在全磷中所占比例均为表层最大,O-P,Ca-P 在全磷中所占比例均为下层最大。不同林龄比较,3 a 林土壤

无机磷含量明显低于其他 3 个年林。

土壤有机磷。根据 Bowman-Colo 法,可将土壤有机磷分为活性有机磷(LO-P)、中等活性有机磷(MLO-P)、中稳态有机磷(MRO-P)以及高稳态有机磷(HRO-P)4 种组分。4 个林龄各组分的平均值: MLO-P(42.95±15.53 mg/kg)>MRO-P(41.58±14.82 mg/kg)>LO-P(17.60±5.02 mg/kg)>HRO-P(10.16±6.15 mg/kg),除 MLO-P 外,其他组分在土壤表层聚集性明显;不同林龄比较,3 a 林土壤有机磷总量(TOP)最低,8 a 林、18 a 林、26 a 林比 3 a 林分别提高了 71.2%,99.9%,72.43%。

2.2 林地土壤有效态磷

0—60 cm 土层 Bray 1-P 含量平均值为 1.77 mg/kg,属低水平,且 3 a 林 Bray 1-P 含量最低,8 a 林、18 a 林、26 a 林分别比 3 a 林提高了 45.4%,95.1%,22.3%。从土壤垂直分布上看,Bray 1-P 含量随土层深度的增加而减小。

2.3 林地土壤微生物生物量磷

MB-P 含量在 3.01~15.39 mg/kg,平均 6.90 mg/kg,占相应土层有机磷总量的 2.5%~13.6%,变化幅度较大,4 种林龄杉木人工林平均值差异不显著;从土壤垂直方向上看,MB-P 含量随土层深度的增加而减小,除 8 a 林外,不同土层 MB-P 含量均表现为表层显著高于中、底层。

表 2 土壤全磷、有效磷、微生物量磷、无机磷、有机磷各组分含量

林龄/ a	土层/ cm	TP	Bray1-P	MB-P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	无机磷 总量	占全磷 比例/%	LO-P	MLO-P	MRO-P	HRO-P	有机磷 总量	占全磷 比例/%
3	0—20	226.45a	1.52a	10.74a	11.89a	26.35a	93.57a	16.06a	147.87a	65.30	18.03a	21.59a	29.27a	10.03a	78.91a	34.70
	20—40	206.37b	1.18b	6.53b	10.01b	20.57b	93.81a	16.28a	140.67a	68.16	13.29b	24.08a	24.95ab	5.37b	67.68ab	31.84
	40—60	209.80b	1.06b	5.57b	9.49b	15.92b	105.53a	17.15a	148.09a	70.59	13.37b	25.64a	20.09b	2.88b	61.97b	29.41
	平均值	214.21A	1.26B	7.62A	10.46A	20.95A	97.64A	16.50A	145.55A	67.95	14.89A	23.77A	24.77A	6.09A	69.52A	32.05
8	0—20	376.37a	2.01a	15.39a	15.76a	47.69a	156.37a	20.76a	240.57a	63.92	24.18a	43.18a	55.10a	13.03a	135.48a	36.08
	20—40	346.45ab	1.86a	8.41a	13.63ab	40.00a	154.48a	20.83a	228.94a	65.98	17.31a	42.50a	45.53a	12.43a	117.78ab	34.02
	40—60	325.49b	1.60a	5.05a	12.31b	38.48a	150.43a	20.81a	222.10a	68.24	16.97a	38.79a	37.02a	11.02a	103.81b	31.76
	平均值	349.61B	1.82AB	9.61A	13.90B	42.06BC	153.76B	20.88B	230.54B	65.94	19.49B	41.49B	45.89B	12.16B	119.02B	34.06
18	0—20	387.26a	3.19a	9.21a	18.76a	52.27a	148.51	22.51a	242.05a	62.50	23.75a	40.30a	66.51a	14.33a	144.90a	37.50
	20—40	374.19ab	2.39b	4.16b	15.56ab	42.21b	141.57a	24.51a	223.85a	59.82	17.72ab	61.03a	58.17ab	13.11ab	150.04a	40.18
	40—60	341.58b	1.77b	3.03b	12.22b	39.93b	140.87a	26.84a	219.86a	64.37	14.30b	57.64a	43.21b	6.91b	122.07b	35.63
	平均值	367.68B	2.45A	5.41A	15.51C	44.80B	143.65B	24.62C	228.59B	62.17	18.59AB	52.99C	55.97C	11.45B	139.00C	37.83
26	0—20	376.21a	1.68a	8.00a	14.37a	43.27a	161.36a	22.50a	241.51a	64.19	21.60a	50.45a	44.30a	18.62a	134.98a	35.81
	20—40	346.68a	1.54a	3.71b	13.00ab	36.50a	149.71a	24.44a	223.65a	64.51	16.64b	57.93a	39.68ab	8.94b	123.18ab	35.49
	40—60	331.22a	1.38a	3.01b	11.17b	36.49a	153.73a	23.09a	224.48a	67.77	14.03b	52.23a	35.09b	5.29b	106.64b	32.23
	平均值	351.37B	1.53AB	4.91A	12.85B	38.75C	154.94B	23.34BC	229.88B	65.42	17.42AB	53.53C	39.69B	10.95AB	121.60B	34.58

注:表中大写字母不同林龄土壤指标差异性比较,小写字母表示相同林龄不同土层土壤指标差异性比较,不同字母表示差异性显著(p<0.05),3 个重复样地的平均值。

2.4 林地微生物生物量磷的影响因子

以 9 个磷素因子和 10 个土壤理化因子为变量,利用多元逐步回归分析、通径分析和相关分析,挑选出对 MB-P 影响显著的优势因子(表 3)。3 a 林:对 MB-P 影响最大的两个因子为 Bray 1-P 和 Al-P。从直接通径系数可知,Bray 1-P 和 Al-P 对 MB-P 的直接作用较大,从间接通径系数也可以看出两者之间的相互作用对 MB-P 影响也很大。8 年林:优势因子有 4 个,分别为 N/P, LO-P, W 和 MRO-P,前三者对 MB-P 产生较大的正效应,而 MRO-P 为负效应,说明 MRO-P 对 MB-P 产生直接的限制作用,但通过 N/P, LO-P,W 可间接对 MB-P 产生较大的正效应。18 a 林:

优势因子最多,N/P,Fe-P, Al-P,Bray 1-P 与 MB-P 呈显著和极显著的正相关,其中 Fe-P 对 MB-P 的直接影响最大且为正向,且其他变量通过 Fe-P 均对 MB-P 产生显著的正效应;LO-P,Al-P,pH 对 MB-P 的直接作用为负效应,但通过 Fe-P 对 MB-P 产生较大的正效应,说明 LO-P,Al-P,pH 可通过 Fe-P 成为 MB-P 的有效补充。26 年林:TP,Fe-P 对 MB-P 的影响最大,两者均与 MB-P 呈极显著的正相关,TP 对 MB-P 的直接影响最大且为正向,Fe-P 对 MB-P 的直接影响较小且为负向,但通过 TP 有一个较大的正向间接通径系数。Ca-P 则不仅具有较高的直接通径系数(−0.94),同时还与 TP 有较高的间接通径系数(1.27)。

表 3 磷素因子和土壤理化因子对 MB-P 的影响

林龄/ a	优势 因子	相关 系数	直接通径 系数	间接通径 系数								
3				Bray 1-P	Al-P							
	Bray 1-P	0.90 * *	0.51		0.39							
	Al-P	0.89 * *	0.48	0.41								
				N/P	LO-P	W	MRO-P					
8	N/P	0.87 * *	0.84		0.40	0.13	−0.50					
	LO-P	0.81 * *	0.69	0.49		0.16	−0.53					
	W	0.67 *	0.30	0.37	0.37		−0.37					
	MRO-P	0.79 *	−0.63	0.67	0.58	0.17						
18				N/P	pH	Fe-P	LO-P	C/P	Al-P	Bray 1-P	HRO-P	
	N/P	0.82 * *	0.50		−0.09	0.98	−0.88	0.48	−0.46	0.22	0.05	
	pH	0.33	−0.14	0.33		0.69	−0.72	0.37	−0.36	0.13	0.02	
	Fe-P	0.82 * *	1.25	0.39	−0.07		−0.87	0.37	−0.47	0.20	0.03	
	LO-P	0.60	−1.03	0.43	−0.09	1.06		0.49	−0.51	0.22	0.04	
	C/P	0.63	0.55	0.44	−0.09	0.84	−0.92		−0.46	0.22	0.06	
	Al-P	0.67 *	−0.53	0.43	−0.09	1.10	−0.99	0.48		0.22	0.05	
	Bray 1-P	0.79 *	0.24	0.46	−0.07	1.02	−0.92	0.49	−0.48		0.05	
	HRO-P	0.58	0.07	0.38	−0.04	0.53	−0.61	0.42	−0.34	0.16		
				TP	Ca-P	pH	P%	Fe-P	MLO-P			
26	TP	0.89 * *	1.65		−0.72	−0.04	0.10	−0.07	−0.04			
	Ca-P	0.43	−0.94	1.27		0.07	0.11	−0.03	−0.05			
	pH	0.27	−0.25	0.25	0.27		0.01	−0.03	0.03			
	P%	0.46	0.21	0.83	−0.50	−0.01		−0.05	−0.01			
	Fe-P	0.80 * *	−0.09	1.17	−0.29	−0.09	0.11		−0.01			
	MLO-P	0.28	−0.07	0.90	−0.68	0.10	0.05	−0.02				

注:n=36,r_{0.05}=0.666,r_{0.01}=0.798;* 代表显著相关,** 代表极显著相关,每个采样点 3 个土层的平均值。

3 讨论

3.1 各林龄杉木人工林磷素形态特征

不同林龄杉木人工林 TP 和 Bray 1-P 含量平均

值分别为 320.71 mg/kg 和 1.77 mg/kg,均属低水平,表明研究地土壤磷素供应能力较差。3 a 林 0—60 cm 土壤剖面的土壤 TP 和 Bray 1-P 含量明显较 8 年林、18 年林、26 年林低,可能是因为 3 a 林郁闭度

小、枯枝落叶少,归还至土壤的磷素量较低,加上经炼山之后,地表裸露,雨水的溅蚀和冲刷导致磷素严重流失,且较多的养分在火烧过程中挥发到了大气中。随着杉木年龄的增大,杉木的郁闭度逐渐提高、林下植被丰富、腐殖质层较厚、单位面积凋落物磷的转化量增大,后期逐渐趋于稳定^[14]。

无机磷各组分以闭蓄态磷 O-P 含量最高,约占无机磷总量的 62.8%~67.4%,其次为 Fe-P, Ca-P 再次, Al-P 最少。且 Al-P 和 Fe-P 主要聚集在 0—20 cm 土层, O-P, Ca-P 主要分布于 20—60 cm 土层,这与余海英等^[15]对温室栽培条件下土壤无机磷组分累积、迁移特征的研究结果一致。土壤 O-P 含量相对较高,会降低土壤磷素的有效性,可供植物和微生物吸收的 Bray 1-P 减少,土壤 MB-P 将被迫释放出来,形成土壤 Bray 1-P 供植物利用,导致 MB-P 含量降低,所以适当降低 O-P 含量是提高 MB-P 含量较理想的途径。土壤有机磷可以通过矿化作用转变成植物可直接吸收利用的无机态磷,因而它是植物生长所需磷素的重要来源^[16-17]。本研究各有机磷组分含量大小顺序为: MLO-P > MRO-P > LO-P > HRO-P,说明本研究的试验林地易被植物吸收利用的有机磷组分含量相对较低。

目前,微生物在转化土壤磷素和调节磷素有效性方面的作用受到越来越多的关注,不少研究表明微生物有活化土壤磷素、分解有机质、增强土壤供磷能力等作用^[18-19]。本研究中,不同林龄杉木人工林 MB-P 含量在 3.01~15.39 mg/kg,占相应土层有机磷总量的 2.89%~12.02%,波动较大,其原因是微生物生命活动对土壤环境的温度、湿度、有机质含量、pH 值、透气性等敏感^[20],造成 MB-P 在土壤中的分布不均匀。

3.2 磷素因子和土壤理化因子对微生物生物量磷影响的相对重要性

不同林龄对 MB-P 影响较大的因子不同,3 a 林杉木根系尚不发达,对速效磷的吸收相对较少,而土壤微生物较活跃,繁殖速度快,需要吸收大量的有效磷,导致 MB-P 与 Bray 1-P 达到极显著的正相关;从 MB-P 与 Al-P, Bray 1-P 的关系可以看出,3 a 林土壤微生物利用的磷素的主要成分为 Al-P。8 a 林,林地郁闭度增加,植物群落与异质性不断发育, TN 的快速增加促进了 MB-P 的积累;有机磷可以提高微生物的活性,使 MB-P 增加,而 LO-P 是土壤中最容易被分解的有机磷,分解释放的磷素为微生物提供磷素营养,促进微生物在生长繁殖中吸收更多的磷,从而转化为 MB-P。土壤含水率对土

壤 MB-P 含量起着积极作用,这与刘纯等^[15]对小兴安岭 6 种森林类型土壤微生物量的研究结果类似,这可能是因为良好的水分环境促进微生物活性,有利于凋落物中的养分的归还,反过来又促进了微生物的生长,从而导致 MB-P 的增加,结果土壤 N/P, LO-P, MRO-P, W 对土壤微生物的影响突出;18 a 林,林木根系发达、凋落层较厚,微生物可利用的营养物质较丰富, Bray 1-P 含量达到最高,其主要成分 Fe-P 和 Al-P 均对 MB-P 正向作用较大,尤其是 Fe-P, Fe-P 对氧化还原环境敏感,在环境发生改变时容易导致磷的吸附与释放,通常被认为是潜在活性磷的重要组成部分,根际微生物分泌有机酸、磷酸酶及质子等物质促使三价铁离子向二价铁离子转变,导致铁磷的释放。SOC 和 TN 占 TP 的比例对 MB-P 的影响较大,可能是因为 SOC 和 TN 是土壤微生物在自身合成和新陈代谢过程中的主要碳源和氮源^[21]。26 a 林, TP, Fe-P 与 MB-P 的相关性均达到极显著,与 TP 的相关性最好,这也预示着土壤 TP 的含量能够较好地指示土壤 MB-P 水平,微生物对 Fe-P 利用从直接利用变成间接利用。土壤孔隙对土壤中的水分的运输、空气的流通、根系的伸展、养分的转化等都有很大影响,进而影响微生物活动,成熟林林下植被发达,土壤微生物区系、土壤酶活性及土壤养分也随之得到恢复和提高,土壤孔隙度对微生物的影响开始凸显。

4 结论

(1) 土壤 TP, Bray 1-P 含量均属低水平,且土壤 TP 活化能力较弱。

(2) 土壤微生物通过同化作用、分解作用、矿化作用,调节土壤磷素养分在“植物—土壤”的循环。

(3) 从土壤磷素因子对 MB-P 的影响来看,不同林龄各因子的影响程度不同。无机磷:幼龄林主要利用 Al-P,近熟林 Fe-P 和 Al-P 对 MB-P 影响较大,成熟林 Fe-P 和 Ca-P 对 MB-P 影响较大;有机磷:幼龄林有机磷对 MB-P 的影响较无机磷小,中龄林以 LO-P, MRO-P 对 MB-P 影响较大,近熟林 LO-P 和 HRO-P 对 MB-P 作用较明显,成熟林 MLO-P 对 MB-P 影响较大。有效磷在幼龄林和近熟林对 MB-P 产生较大的作用。

(4) 从土壤理化因子来看, SOC 和 TN 占 TP 的比例对 MB-P 的影响较突出,尤其表现在中龄林和近熟林;而近熟林和成熟林, pH 对 MB-P 的影响有所表现;土壤 W 和 P% 分别中龄林和成熟林对 MB-P 的影响也大。

参考文献:

- [1] Sun H Y, Wu Y H, Yu D, et al. Altitudinal gradient of microbial biomass phosphorus and its relationship with microbial biomass carbon, nitrogen, and rhizosphere soil phosphorus on the eastern slope of Gongga Mountain, SW China[J]. Plos One, 2013,8(9):e72952.
- [2] 赵晓蕊. 武功山山地草甸土壤磷素的空间分布及磷素有效性的研究[D]. 南昌:江西农业大学,2013.
- [3] 曹小玉,李际平,闫文德. 不同龄组杉木林土壤有机碳与氮磷钾分布特征及耦合关系[J]. 土壤通报,2014,45(5):1137-1143.
- [4] 周丽丽. 不同发育阶段杉木人工林养分内循环与周转利用效率的研究[D]. 福州:福建农林大学,2014.
- [5] 曹小玉,李际平,张彩彩,等. 不同龄组杉木林土壤有机碳和理化性质的变化特征及其通径分析[J]. 水土保持学报,2014,28(4):200-205.
- [6] 张胜利. 湖南省杉木林碳贮量及未来碳贮量潜力分析[D]. 长沙:中南林业科技大学,2014.
- [7] 李胜蓝,方晰,项文化,等. 湘中丘陵区 4 种森林类型土壤微生物生物量碳氮含量[J]. 林业科学,2014,50(5):8-16.
- [8] 中华人民共和国林业行业性标准. 森林土壤分析方法[M]. 北京:国家林业局,1999.
- [9] 中国土壤学会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京:科技出版社,1983.
- [10] Bowman R A, Cole C V. Transformations of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by NaHCO_3 extraction[J]. Soil Science, 1978,125(1):49-54.
- [11] 吴金水,肖和艾,陈桂秋,等. 旱地土壤微生物磷测定方法研究[J]. 土壤学报,2003,40(1):70-781.
- [12] 刘纯,刘延坤,金光泽. 小兴安岭 6 种森林类型土壤微生物量的季节变化特征[J]. 生态学报,2014,34(2):451-459.
- [13] 赵洪书. 从容重计算土壤总孔隙度的初步探讨[J]. 土壤学报,1964,12(2):230-234.
- [14] 郭琦. 杉木人工纯林凋落物及土壤养分循环研究[D]. 北京:北京林业大学,2014.
- [15] 余海英,李廷轩,张树金,等. 温室栽培条件下土壤无机磷组分的累积、迁移特征[J]. 中国农业科学,2011,44(5):956-962.
- [16] 章文龙,曾从盛,陈晓艳,等. 闽江河口湿地土壤速效磷时空分布与来源[J]. 生态学杂志,2015,34(1):168-174.
- [17] Juma S, Maida J H A. Potentially mineralisable phosphorus as a source of plant available phosphorus[J]. Trop. Agric, 2014,91(2):75-86.
- [18] Khosro Mohammadi. Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production [J]. Resources and Environment, 2012,2(1):80-85.
- [19] Richardson A E, Simpson R J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus [J]. Plant Physiology, 2011,156(3):989-996.
- [20] Logah V, Safo Y, Quansah C, et al. Soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus dynamics under different amendments and cropping systems in semi-deciduous forest zone of Ghana[J]. West African Journal of Applied Ecology, 2010,17(1):121-133.
- [21] 贾伟. 不同林龄马尾松人工林土壤微生物量碳氮含量变化规律研究[J]. 现代农业科技,2014(10):164-165,168.