

不同集约经营年限对雷竹林土壤磷形态的影响

许晓丽^{1,2}, 杨兴¹, 陆扣萍¹, 何丽芝², 徐颂³, 王海龙^{1,3}

(1. 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 杭州 311300; 2. 浙江农林大学环境与资源学院, 杭州 311300; 3. 佛山科学技术学院环境与化学工程学院, 广东 佛山 528000)

摘要: 为研究不同集约经营年限下雷竹林土壤的磷形态特征, 采集分别经营 3, 9, 15 年的雷竹林上层(0—20 cm)和下层(20—40 cm)土壤样品, 测定土壤 pH、有机碳、全磷(TP)、Olsen P、Mehlich-3 P 等理化性质, 并采用改进的 Hedley 分级法分析土壤中不同形态磷的含量。结果表明: 在集约经营 9, 15 年后, 上层土壤 pH 低于雷竹正常生长范围, 且有酸化深层化现象; 土壤有机碳主要在上层土壤中积累, 经营 15 年为各处理中最高, 较 3 年提高了 183%。上、下层土壤 TP、Olsen P、Mehlich-3 P、活性磷($H_2O-P + NaHCO_3-Pi + NaHCO_3-Po$)和中稳性磷($NaOH-Pi + NaOH-Po$)含量均随经营时间逐渐增加。与 3 年相比, 集约经营 15 年后活性磷和中稳性磷占总磷百分比在上层土壤中提高了 63% 和 83%, 在下层土壤中提高了 88% 和 128%; 而上、下层土壤难溶性磷($HCl-P + Res-P$)所占百分比则分别从 58% 和 66% 降低至 26% 和 29%, 难溶性磷的含量基本不变。由此可见, 持续、大量施用磷肥提高了雷竹林土壤中活性磷和中稳性磷比例。此外, Mehlich-3 P- H_2O-P 拟合方程推测上、下层土壤均有可能已发生磷酸盐流失。因此, 雷竹林集约经营过程中应注意合理施肥, 以免造成磷流失。

关键词: 集约经营; 雷竹; 磷形态; 磷有效性

中图分类号: S157.4⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0225-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.01.035

Effect of Different Intensive Management Durations on Soil Phosphorus Fractions in Lei Bamboo (*Phyllostachys praecox*) Forest

XU Xiaoli^{1,2}, YANG Xing¹, LU Kouping¹, HE Lizhi², XU Song³, WANG Hailong^{1,3}

(1. Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, Hangzhou 311300;

2. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300;

3. School of Environment and Civil Engineering, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000)

Abstract: To investigate the characteristics of soil phosphorus fractions in *Phyllostachys praecox* stands, samples of upper (0—20 cm) and lower (20—40 cm) soil layers were collected from stands which were intensively managed for 3, 9 and 15 years, respectively. The soil physico-chemical properties such as pH, soil organic carbon (SOC), total phosphorus (TP), Olsen P, and Mehlich-3 P were determined. Additionally, the concentrations of different phosphorus fractions were measured with modified Hedley's sequential extraction procedures. The results showed that the pH of top soil significantly decreased in the 9- and 15-year intensive management plots where acidifications of subsurface soil were observed. The SOC mainly accumulated in the top layer soil, and the highest SOC content was observed in the 15-year intensive management plots, which increased by 183% compared to the 3-year intensive management plots. Moreover, the concentrations of TP, Olsen P, Mehlich-3 P, labile P ($H_2O-P + NaHCO_3-Pi + NaHCO_3-Po$) and moderately labile P ($NaOH-Pi + NaOH-Po$) in both soil layers all increased with the prolonging of plantation tation time. Compared with the 3-year intensive management plots, the proportion of labile P and moderately labile P in the 15-year intensive management stands increased by 63% and 83% for topsoil layer, and 88% and 128% for the lower soil layer, respectively, however, the proportions of sparingly labile P ($HCl-P + Res-P$) decreased from 58% to 26% for topsoil layer and from 66% to 29% for lower soil layer, respectively, whereas the contents of sparingly labile P had no significant difference between these two treatments. Thus, applied phosphorus fertilizer was mainly built up in the labile P and moderately labile P fractions under the

收稿日期: 2017-08-29

资助项目: 国家自然科学基金项目(41401338, 21577131)

第一作者: 许晓丽(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力与环境效应的研究。E-mail: xxxuxiaoli@163.com

通信作者: 王海龙(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土资源利用与生态环境修复研究。E-mail: hailong@zafu.edu.cn

P. praecox stands. According to the Mehlich—3 P—H₂O—P linear equation, we could speculate that phosphorus loss may have occurred in both soil layers. Therefore, fertilization should be properly managed in *P. praecox* stands to avoid excessive phosphorus loss.

Keywords: intensive management; *Phyllostachys praecox*; phosphorus fractions; phosphorus availability

雷竹(*Phyllostachys praecox* cv. *Prevernalis*), 禾本科竹亚科刚竹属竹种, 具有出笋早、产量高、笋期长、适应性强等特点^[1]。近年来, 雷竹种植面积不断扩大, 浙江省德清、余杭、临安等雷竹主要种植区的面积已达 6 万 hm²^[2]。雷竹林地大部分由水稻田改造而成, 并在母竹定植后采取集约经营种植模式培育雷竹。集约经营模式是竹农在技术人员指导下, 试验发现的一种雷竹高产经济模式, 即每年冬季给雷竹林地表覆盖稻草和砻糠, 同时施用大量化肥, 以增加土壤温度, 从而促使雷竹提早出笋, 提高竹笋产量, 获得高额经济效益^[3-4]。然而雷竹林地每年约 2.25 t/hm² 的化肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)投入量, 远远超出林地当年作物的需求。其中, 化学磷肥的利用率仅为 10%~25%^[5], 长期投入化学磷肥不但增加了农业生产成本, 而且导致大量磷在土壤中超量累积^[6], 甚至造成了土壤酸化等一系列环境问题^[7-8]。已有研究^[9]指出, 在强降雨条件下, 雷竹林表层土壤中的磷酸盐极易通过地表径流进入周围水体, 为水体环境带来了富营养化风险。

长期集约经营一方面造成了雷竹林表层土壤磷积累, 另一方面也对土壤磷的形态产生了影响。已有研究^[10]表明, 稻草/砻糠覆盖—重施肥集约种植方式对雷竹林土壤肥力, 尤其是土壤中磷的迁移转化造成了重要影响。黄芳等^[11]发现雷竹集约经营 15 年后, 土壤全磷与有效磷含量随种植年限增加而增加, 其中有机磷占全磷比例约为 20%~29%, 土壤各形态磷均表现出在土壤表层(0—20 cm)聚积的现象。孙达等^[12]对雷竹林土壤剖面进行纵向深度的分析, 发现长期集约经营后土壤全磷、有效磷、有机磷含量均随深度逐渐降低。目前, 关于雷竹林土壤磷的研究中, 大多是针对土壤全磷、有效磷等一些常见指标的探讨和探究, 且大多局限在表层土壤, 缺乏对深层土壤磷形态特征和变化规律的研究。

本研究采取以横向空间代替纵向时间的研究手段, 采用 Sui 等^[13]改进的 Hedley 分级法对长期稻草/砻糠覆盖—重施肥经营模式对不同深度(0—20, 20—40 cm)雷竹林土壤中不同磷形态与含量进行探究, 以期对竹农合理施用磷肥、减少种植经济投入、减缓环境问题提供有效科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究试验地位于浙江省西北部的临安市太湖源

镇横徐村(北纬 30°18′, 东经 119°34′)。研究区土壤为红壤, 质地为黏壤土(黏粒 23.5%, 粉粒 37.9%, 砂粒 38.6%), 0—20 cm 土层养分状况为: 全磷 762.3 mg/kg、全氮 1.1 g/kg、有机碳 9.7 g/kg、pH 6.35, 20—40 cm 土层中全磷、全氮、有机碳含量分别为 762.3 mg/kg, 1.1 g/kg 和 9.2 g/kg, pH 6.95, 供试雷竹林地均由水稻田改造而来。试验地属亚热带季风气候区, 四季分明, 雨量充沛, 气候温和湿润, 年平均温度 15.8℃, 年均无霜期 241 d, 年均降水量 1 460 mm。

1.2 样地设置及施肥管理

本试验选取空间位置相近、生长条件相似、成土类型一致的种植年限分别为 3, 9, 15 年的雷竹林地, 每个种植年限 4 个重复, 共 12 个采样区, 每个样区大小约 15 m×15 m。雷竹林集约经营施肥措施如下: 每年施肥 3 次, 每次施肥量基本相等, 每次复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)投入量约 0.75 t/hm², 施肥时间分别是 5 月中旬、8 月下旬—9 月中旬、11 月中旬—12 月上旬, 其中 8 月下旬—9 月中旬施肥时另加尿素 0.525 t/hm²。11 月中旬—12 月上旬施肥一周后, 农户进行冬季覆盖, 先覆盖稻草(10~15 cm 厚)后覆盖砻糠(10~15 cm 厚), 稻草和砻糠使用量约为 40, 55 t/hm²; 第 2 年 4 月上旬, 竹农回收未腐烂砻糠, 翻晒待下半年再用, 下层稻草基本腐烂入土。

1.3 土样采集与测定方法

1.3.1 土样采集 本试验土壤样品采集于 2016 年 5 月 18 日, 按照“S”形采样法分别采集经营 3, 9, 15 年雷竹林不同深度(0—20, 20—40 cm)的土壤, 共采集 12 个采样区 24 个混合土样。剔除根系、碎石等杂质, 充分混匀, 风干, 磨细过筛后保存待测。

1.3.2 基本理化性质测定 有机碳含量由重铬酸钾—外加加热法测定^[14]。土壤 pH 用 FE20 型 pH 计测定, 水土比为 2.5:1。土壤全磷采用 HClO₄—H₂SO₄ 法消煮, 抗坏血酸—钼蓝比色法测定。有效磷分别采用 Olsen 法^[15]和 Mehlich 3 法^[16]测定。

1.3.3 土样磷分级 土壤磷分级实验采用由 Sui 等^[13]对 Hedley 法^[17]改进后的分级方法连续浸提, 具体步骤为:

称取 1 g 过 100 目筛的风干土于 100 mL 离心管中, 依次在 30 mL H₂O、30 mL 0.5 mol/L NaHCO₃ (pH 8.5)、30 mL 0.1 mol/L NaOH 和 30 mL 1 mol/L HCl 中持续浸提 16 h, 分别得到 H₂O—P、

NaHCO₃-Pi、NaOH-Pi、HCl-P。在 NaHCO₃ 与 NaOH 浸提液中加入过硫酸钾,高压灭菌锅内(120 kPa, 121 ℃)消煮(NaHCO₃ 浸提液消煮 60 min, NaOH 浸提液消煮 90 min),测定总磷含量(NaHCO₃-Pt/NaOH-Pt),通过总磷(NaHCO₃-Pt/NaOH-Pt)减去无机磷(NaHCO₃-Pi/NaOH-Pi)计算得到差值即为浸提液中有机磷含量(NaHCO₃-Po/NaOH-Po)。土样残渣经 H₂SO₄-H₂O₂ 法在 360 ℃ 条件下消煮后,得到残渣态磷(Res-P)浸提液。以上各浸提液磷含量用抗坏血酸—钼蓝比色法测定。

1.4 统计分析

试验数据采用 Excel 2007 和 SPSS 20.0 软件进行整理、分析,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)和最小显著差数法(LSD)进行显著性($P<0.05$)统计检测。

2 结果与分析

2.1 集约经营对土壤 pH、SOC 的影响

由表 1 可知,雷竹林经营 3 年时土壤 pH 为各年份中最高,随着雷竹林经营年限延长,pH 呈下降趋势,不过上层土壤(0—20 cm)3 个经营年份间并无显著性差异;而下层土壤(20—40 cm)pH 随时间显著($P<0.05$)降低,经营 15 年后较 3 年时降低了 42%。此外,上、下层土壤 pH 在集约经营 3,9 年时表现为:上层土壤>下层土壤,而在经营 15 年时,下层土壤 pH 较上层降低了 1.07。土壤有机碳与 pH 变化趋势相反,随着雷竹种植年限延长,上层土壤有机碳含量呈逐渐增加趋势,而下层土壤有机碳则较 3 年时无显著性变化。另外,与 3 年相比,集约经营 15 年后,上层土壤有机碳含量增加显著($P<0.05$),增幅达 183%,可见,有机碳主要在 0—20 cm 土层积累。

表 1 不同集约经营年限雷竹林土壤 pH 及 SOC 含量			
土层 深度/cm	经营 年限/a	pH	SOC/ (g · kg ⁻¹)
0—20	3	6.47±0.68ab	10.46±1.28c
	9	5.16±0.46bc	20.92±1.17b
	15	5.13±0.24bc	29.63±2.03a
20—40	3	7.06±0.35a	10.64±1.03c
	9	5.56±0.67b	14.74±1.51c
	15	4.06±0.05c	14.42±1.42c

注:表中数据为平均值±标准误差;不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 集约经营对土壤全磷和有效磷的影响

不同集约经营年限雷竹林土壤全磷(TP)含量如图 1 所示,与经营 3 年相比,经营 9 年后,上层土壤 TP 含量显著($P<0.05$)提高,而下层土壤 TP 含量并无显著性变化。集约经营 15 年时,上、下层土壤 TP 含量为各处理中最高,较 3 年时分别增加了

118%和 107%。此外,相同经营年份下,土壤 TP 含量表现为:上层土壤>下层土壤,可见长期集约经营会造成雷竹林土壤磷大量积累,在上层土壤积累效果尤为明显。雷竹林土壤有效磷(Olsen P、Mehlich-3 P)与 TP 随经营时间的变化趋势基本相同,在相同经营年份下,不同土层 Olsen P、Mehlich-3 P 含量与 TP 含量分布趋势一致,均表现为:上层土壤>下层土壤。与 3 年相比,经营 9,15 年后,上层土壤中 Olsen P 和 Mehlich-3 P 含量均显著($P<0.05$)增加,且以 15 年时最高。该年份下,Olsen P 和 Mehlich-3 P 含量分别为 199,471 mg/kg,分别为 3 年时的 4.1,4.2 倍。下层土壤中 Olsen P 和 Mehlich-3 P 含量也在经营 15 年时增加最显著($P<0.05$),分别为经营 3 年时的 4.3,5.2 倍。

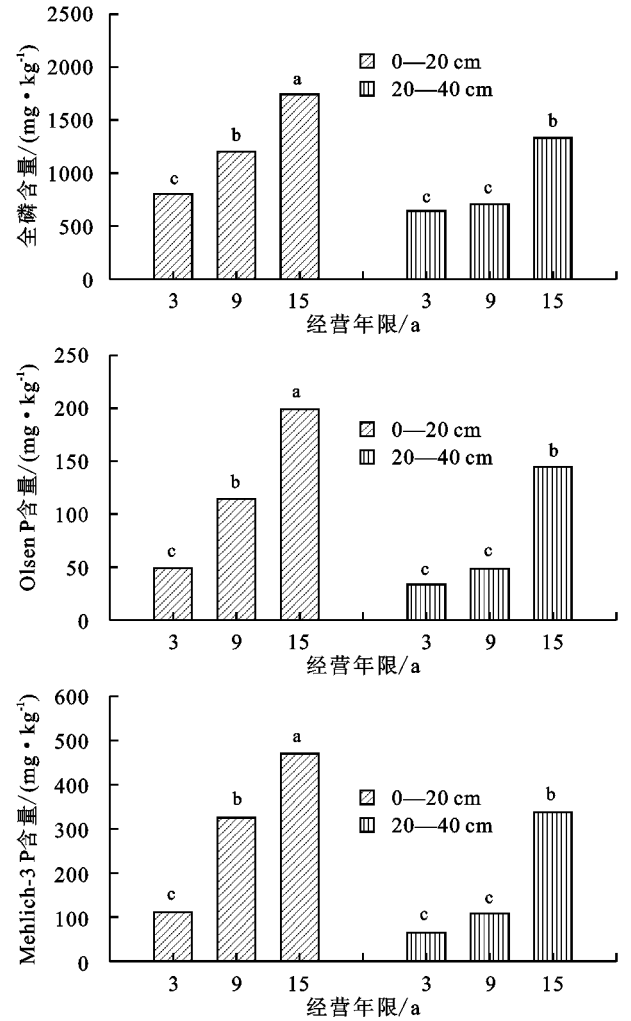


图 1 不同集约经营年限雷竹林土壤全磷、有效磷含量

2.3 集约经营对雷竹林土壤中不同形态磷的影响

2.3.1 集约经营对土壤无机磷的影响 由表 2 可知,雷竹林土壤中各形态无机磷含量以 NaOH-Pi 最多,其次为 NaHCO₃-Pi。总体而言,长期集约经营(15 年)较经营初期(3 年)显著($P<0.05$)提高了雷竹林上、下层土壤中总无机磷含量,相同经营年份下,上层土壤中各形态无机磷含量不同程度高于下层土壤。

长期集约经营急剧增加了雷竹林土壤中 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}$ P 含量(表 2)。经营 9,15 年后,上层土壤 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}$ 含量显著($P<0.05$)高于经营 3 年时,经营 15 年的 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}$ 含量约为经营 3 年时的 6.2 倍; NaHCO_3-Pi 和 $\text{NaOH}-\text{Pi}$ 在上层土壤中的变化趋势与 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}$ 一致,经营 15 年后, NaHCO_3-Pi 和 $\text{NaOH}-\text{Pi}$ 含量显著

($P<0.05$)高于其他 2 个年份。与集约经营 3 年相比,下层土壤 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}$ 、 NaHCO_3-Pi 和 $\text{NaOH}-\text{Pi}$ 含量在集约经营 9 年后并无显著性变化,而在经营 15 年后显著($P<0.05$)增加,增幅分别为 3 年时的 3.1、2.2、3.4 倍。然而,随着集约经营年限增加,上、下层土壤中 $\text{HCl}-\text{P}$ 含量基本无变化。

表 2 不同集约经营年限雷竹林土壤各形态无机磷的含量

土层 深度/cm	种植 年限/a	无机磷含量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)					总无机磷 占总磷比例/%
		$\text{H}_2\text{O}-\text{P}$	NaHCO_3-Pi	$\text{NaOH}-\text{Pi}$	$\text{HCl}-\text{P}$		
0—20	3	16.6±0.5cd	103.9±2.1c	143.3±46.2c	89.1±17.2a	352.9c	51.0
	9	63.5±10.9b	220.8±10.1b	308.4±32.5b	90.9±42.2a	685.6b	65.6
	15	102.8±4.7a	334.0±19.6a	501.0±45.9a	86.7±22.5a	1024.5a	65.4
20—40	3	7.8±0.7d	78.5±5.0c	89.2±19.2c	89.4±16.7a	264.9c	45.0
	9	10.1±2.6d	93.7±10.6c	181.9±50.6c	63.5±30.3a	349.0c	54.5
	15	32.3±5.5c	248.7±29.2b	391.6±44.6ab	33.1±3.4a	705.7b	65.8

注:总无机磷指不同经营年限下土壤 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}$ 、 NaHCO_3-Pi 、 $\text{NaOH}-\text{Pi}$ 和 $\text{HCl}-\text{P}$ 的总和。

2.3.2 集约经营对土壤有机磷和残渣磷的影响 由表 3 可知,雷竹林土壤中有机磷含量占总磷比例较低,其形态以 $\text{NaOH}-\text{Po}$ 为主,但随着经营年限增加, NaHCO_3-Po 占有有机磷比例也逐步增加,且在集约经营 15 年后,土壤总有机磷占总磷比例达到最高。此外,有机磷含量在土壤中的分布情况与无机磷一致,均表现为:上层土壤>下层土壤。

集约经营初期(3 年),上层土壤中 NaHCO_3-Po 和 $\text{NaOH}-\text{Po}$ 含量为各年份中最低,之后随经营时间延长,各形态有机磷含量均呈逐渐提高的趋势。集约经营 9 年后, NaHCO_3-Po 、 $\text{NaOH}-\text{Po}$ 含量较 3 年时显著

($P<0.05$)提高 139%,90%。经营 15 年后,上层土壤 NaHCO_3-Po 和 $\text{NaOH}-\text{Po}$ 含量为 3 年时的 4.7、8.3 倍,显著($P<0.05$)高于经营 3、9 年的处理。下层土壤中 NaHCO_3-Po 含量在经营 9 年后较 3 年无显著性变化,经营 15 年后显著($P<0.05$)高于其他处理,分别为 3、9 年时的 4.9、2.3 倍;与 NaHCO_3-Po 变化趋势相似,相比于 3 年,经营 9 年后,下层土壤 $\text{NaOH}-\text{Po}$ 含量无显著性变化,而经营 15 年后有显著($P<0.05$)提高,增幅为 284%。上、下层土壤残渣磷在集约经营初期占总磷比例较大,随经营时间延长逐渐降低,但上、下层土壤残渣磷含量在不同经营年限间均无显著性差异。

表 3 不同集约经营年限雷竹林土壤有机磷和残渣磷的含量

土层 深度/cm	种植 年限/a	有机磷含量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)				残渣态磷含量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	
		NaHCO_3-Po	$\text{NaOH}-\text{Po}$	总有机磷	占总磷比例/%	$\text{Res}-\text{P}$	占总磷比例/%
0—20	3	10.9±1.3d	30.1±5.2c	30.3c	4.4	309.3±40.8a	44.7
	9	26.0±3.6bc	57.1±7.4b	61.5b	5.9	298.7±78.0a	28.6
	15	50.8±7.1a	86.5±14.4a	211.6a	13.5	330.2±65.0a	21.1
20—40	3	7.6±0.9d	14.3±0.6c	21.9c	3.7	301.6±20.8a	51.3
	9	16.7±2.6cd	35.1±5.5bc	39.4c	6.2	252.2±71.1a	39.4
	15	37.7±5.6b	54.8±3.9b	92.5b	8.6	273.7±18.9a	25.5

注:总有机磷指不同经营年限下土壤 NaHCO_3-Po 和 $\text{NaOH}-\text{Po}$ 的总和。

2.4 集约经营对土壤各形态磷占总磷百分比的影响

由图 2 可知,上层土壤中活性磷($\text{H}_2\text{O}-\text{P}+\text{NaHCO}_3-\text{Pi}+\text{NaHCO}_3-\text{Po}$)占总磷比例随经营年份增加而有不同程度增加,与经营 3 年相比,经营 9、15 年后,其活性磷占总磷比例从 19%分别上升到 30%和 31%;中稳性磷($\text{NaOH}-\text{Pi}+\text{NaOH}-\text{Po}$)占总磷百分比在经营 3 年时仅为 23%,为各处理中最低,在经营 9、15 年时分别提高到 33%和 42%;与中稳性磷变化趋势相反,难溶性磷($\text{HCl}-\text{P}+\text{Res}-\text{P}$)则在经营 3 年时高达 58%,高于经营 9、15 年时所占百分比(37%和 27%)。

集约经营初期(3 年),下层土壤中以难溶性磷占

总磷百分比最大(66%),随着经营年限延长,难溶性磷占总磷百分比逐渐下降,而活性磷占总磷百分比则有不同程度提高,经营 15 年后,活性磷占总磷百分比为各处理中最大,达 30%。此外,下层土壤中稳性磷变化趋势与上层土壤一致,经营 3 年时为各处理中最低,仅为 18%,而经营 15 年时增至 42%。

2.5 雷竹林土壤 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}$ 与 Olsen P、Mehlich-3 P 的关系

对雷竹林上、下层土壤 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}$ 与 Olsen P 进行一元线性回归拟合,两者关系如图 3 所示。雷竹林上、下层土壤 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}$ 和 Olsen P 间呈显著($P<$

0.05)正相关关系($n=12$),但 H_2O-P 随 Olsen P 增加的幅度在不同土层存在差异。上层土壤中, H_2O-P 随 Olsen P 增加的幅度较为均一,而下层土壤中, H_2O-P 随 Olsen P 增加的幅度在某一点开始变化,即图 3b 中前后两条直线的斜率突变点(change point),该点约位于 Olsen P 为 46 mg/kg 处,突变点前 H_2O-P 随 Olsen P 增加幅度较小,突变点后 H_2O-P 增加幅度则相对较大。雷竹林上、下层土壤 H_2O-P 与 Mehlich-3 P 一元线性回归拟合结果与上层土壤中 H_2O-P 与 Olsen P 的关系一致(图 3c、d)。上、下层土壤 H_2O-P 随 Mehlich-3 P 增加的幅度均保持均一,并未出现突变点。

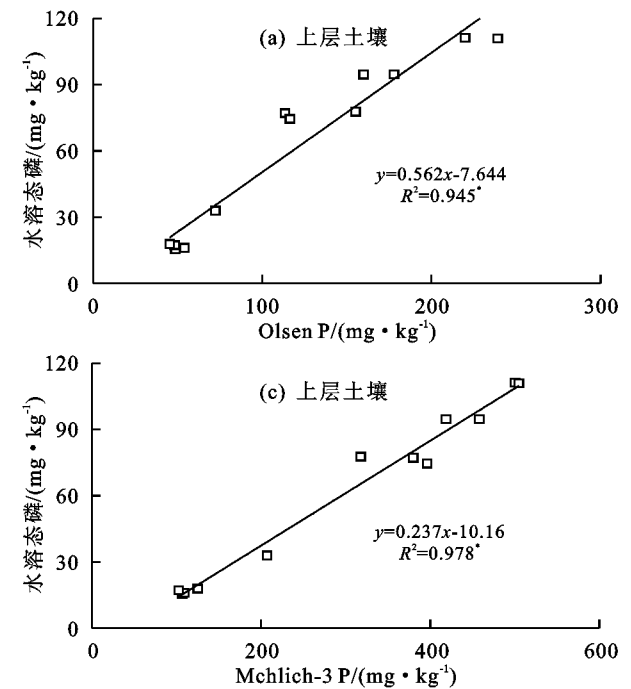


图 3 雷竹林土壤水溶态磷与有效磷的关系

2.6 雷竹林土壤理化性质与各形态磷的相关性分析

分别对不同深度雷竹林土壤中的 TP、Olsen P、Mehlich-3 P 以及各形态磷与 pH、SOC 进行相关性分析,结果如表 4 所示。雷竹林上层土壤中,除了 HCl-P 与 Res-P,其余各形态磷及 TP、Olsen P、Mehlich-3 P 均与 SOC 呈显著($P<0.05$)正相关关系,而与 pH 则呈负相关关系,各形态磷中以 NaOH-Pi 与 SOC、pH 间相关性最好,相关系数分别为 0.856, -0.687 。此外,pH 与 HCl-P、Res-P 呈正相关关

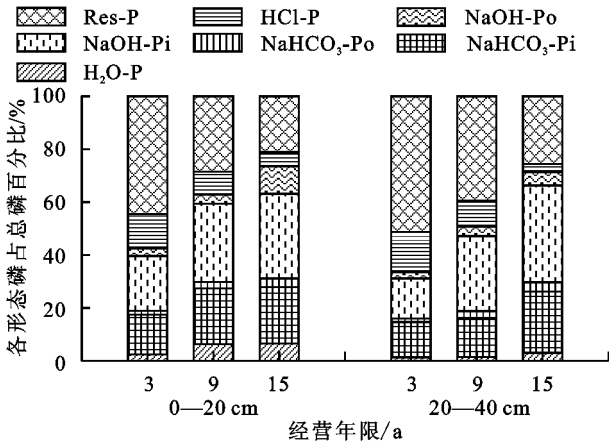
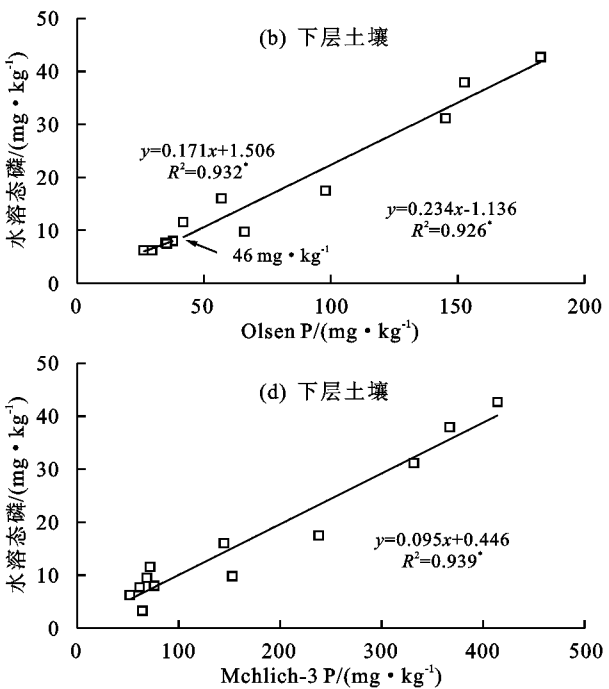


图 2 不同集约经营年限雷竹林土壤中各形态磷占总磷百分比



系,且相关性达到显著($P<0.05$)水平。

下层土壤中,pH 与 HCl-P、Res-P 均呈显著($P<0.05$)正相关关系,相关系数达 0.885,0.652,高于上层土壤,而 pH 与其他形态磷、TP、Olsen P 及 Mehlich-3 P 间均呈显著($P<0.05$)负相关关系,其中与 NaOH-Pi 间相关系数最高,为 0.910;SOC 则与 pH 呈现相反趋势,但 SOC 与 TP、Olsen P、Mehlich-3 P 及各形态磷组分间相关关系均未达到显著水平。

表 4 雷竹林土壤理化性质与各形态磷的相关系数

土层 深度/cm		H ₂ O-P	NaHCO ₃ -Pi	NaHCO ₃ -Po	NaOH-Pi	NaOH-Po	HCl-P	Res-P	TP	Olsen P	Mehlich-3 P
0—20	pH	-0.466	-0.487	-0.553	-0.687*	-0.636*	0.650*	0.613*	-0.368	-0.504	-0.508
	SOC	0.886*	0.968*	0.733*	0.856*	0.673*	0.180	0.337	0.939*	0.853*	0.922*
20—40	pH	-0.595*	-0.701*	-0.815*	-0.910*	-0.907*	0.885*	0.652*	-0.681*	-0.729*	-0.751*
	SOC	0.289	0.370	0.141	0.288	0.447	-0.076	-0.036	0.360	0.300	0.303

注: * 表示显著相关($P<0.05$)。

3 讨论

土壤酸化是雷竹林集约经营过程中较为多见的土壤质量问题。张永春等^[18]研究指出,大量施用化肥是导致土壤酸化的一个重要原因。由本研究结果可知,经营 9 年的雷竹林上层土壤 pH 仅为 5.16,低于雷竹正常生长的 pH 范围(5.5~7.0),而集约经营 15 年后,上层土壤 pH 与经营 9 年时相比并未有显著性变化,而下层土壤 pH 则较 9 年下降了 27%(表 1)。可见长期集约经营过程中大量施肥不仅会造成表层土壤 pH 有下降趋势,而且会导致土壤酸化深层化现象,这与徐祖祥等^[19]的研究结果一致。除了施肥,雷竹自身分泌的有机酸等物质以及大量稻草、苍糠的覆盖等也会对土壤 pH 造成影响^[20]。另外,本研究发现土壤有机碳尤其是 0—20 cm 土层有机碳含量受集约经营影响较大,集约经营 3 年时有机碳含量为各处理中最低,随着经营年份增加有机碳含量显著增加,这与刘国群^[21]的研究结果一致。王改玲等^[22]研究发现,化肥配施秸秆有利于提高土壤有机质含量。在本研究条件下,土壤有机碳含量随经营时间提高是由于雷竹林冬季覆盖了大量稻草、苍糠,其中 40 t/(hm²·a)稻草基本都腐烂入土,这有效增加了土壤有机碳含量。

土壤全磷是判断土壤磷含量变化特征的重要指标^[23]。本研究结果表明,随着集约经营年限的增加雷竹林土壤全磷含量呈显著提高趋势(图 1),可见集约经营模式下的大量施肥措施造成了该研究区土壤磷素超量积累。一般来说,有效磷含量更能直接反映土壤磷供应情况,本研究发现土壤中有效磷与全磷含量呈现相似的增长趋势,雷竹林上、下层土壤中 Olsen P 含量在雷竹集约经营 15 年后分别为 3 年时的 4.1、4.3 倍。究其原因:一方面,是由于高强度大量施肥急剧提高了土壤有效态磷含量^[24];另一方面,pH 下降可能导致本来较为难溶的结合态磷被释放出来成为有效磷源^[25],这也可能是本研究条件下,雷竹林土壤 pH 与 Olsen P 呈负相关关系的原因。然而,土壤超量磷素积累也意味着该区域磷流失危机的增加。Bai 等^[26]认为建立 Olsen P—CaCl₂—P 分段拟合方程可以评估土壤 Olsen P 淋失临界值,即当土壤中 Olsen P 超过该值时,土壤排出水的磷浓度很可能引起水体富营养化,因此评估雷竹林土壤 Olsen P 淋失临界值对其周围水体环境具有重要意义。然而,不同质地土壤的磷素淋失临界值各不相同,钟晓英等^[27]研究了来源于我国 13 个省市的 23 种土壤,发现其 Olsen P 淋失范围为 30~157 mg/kg。陈闻等^[28]研究发现雷竹林表层土壤的 Olsen P 淋失阈值

仅为 53 mg/kg。本研究发现,上层土壤 Olsen P—H₂O—P 和 Mehlich—3 P—H₂O—P 方程中均未出现突变点(图 3),此外,由图 1 可知,雷竹林下层土壤中 Olsen P 和 Mehlich—3 P 均随经营年限逐渐增加,这都意味着上层土壤已经发生了磷淋失。有研究^[29-30]指出,长期大量施用磷肥的雷竹林地不仅会发生磷酸盐淋失,在降雨条件下,雷竹林地表极易形成地表径流而导致磷流失,这是造成土壤磷损失的重要途径。本试验结果表明,下层土壤的 Mehlich—3 P—H₂O—P 方程上未出现突变点而 Olsen P—H₂O—P 方程突变点约位于 Olsen—P 为 46 mg/kg 处,因此,集约经营初期(3 年)下层土壤磷素还未达到淋失水平(34 mg/kg),而经营 9 年后 Olsen P(49 mg/kg)已达到淋失临界值,具有淋失可能。徐祖祥等^[19]发现长期集约经营的雷竹林地均表现出了有效磷在表层土(0—10 cm)聚集的现象,集约经营 5 年的雷竹林表土层有效磷含量约为 200 mg/kg。综上所述,在雷竹林地通过建立 Mehlich—3 P—H₂O—P 方程能更为灵敏地判断该地土壤磷酸盐淋失危机指标,研究还发现,长期集约经营模式下的雷竹林地不但贮存养分功能渐失,而且极有可能成为磷流失污染源。

NaHCO₃—Pi 是可溶的活性磷,NaHCO₃—Po 是可被快速矿化分解的有机磷,两者与 H₂O—P 组成的活性磷库可为作物生长提供有效磷素^[31]。本研究发现,活性磷(H₂O—P+NaHCO₃—Pi+NaHCO₃—Po)含量随经营年限增加而提高,经过 15 年集约经营,上、下层土壤中活性磷占总磷比重分别达到 31%和 30%,高于黄淮海低平原潮土高量化肥种植区活性磷占总磷百分比(0.4%~0.9%)^[32]及浙江水网地区稻麦轮作土壤活性磷占总磷百分比(5.8%~16.4%)^[33]。由此看来,与其他经营模式相比,长期集约经营雷竹林土壤磷有效性处于较高水平,其原因可能是:(1)大量施用化肥急剧提高了土壤无机磷含量,冬季覆盖的稻草基本都腐烂入土,易被分解的稻草为土壤带入了大量有机质并有利于提高土壤有机磷含量;(2)较低 pH 条件有利于土粒、氧化物、有机固相表面吸附活性磷,这是由于 pH 低时,土壤中 H⁺ 浓度高,黏粒矿物表面的 OH⁻ 被质子化,形成 OH²⁺,提高了吸附活性。同时,这也可能是土壤 pH 与 H₂O—P、NaHCO₃—Pi、NaHCO₃—Po 含量呈负相关的原因(表 4)。张涛等^[34]对不同集约经营年份雷竹林 0—20 cm 土壤开展 Hedley 磷分级试验,研究发现长期集约经营后,土壤中各形态磷含量均随经营时间提高,土壤活性磷占总磷比例升高、中稳性磷占总磷比例小幅度下降以及难溶性磷占总磷比例降低。本研究发现,集约经营 15 年后上、下层土壤中稳性磷(NaOH—Pi+

NaOH-Po) 占总磷百分比比较 3 年时分别提高了 83% 和 127%, 土壤难溶性磷(HCl-P+Res-P) 所占百分比则分别从 58% 和 66% 降低至 26% 和 29%, 但各年份间土壤难溶性磷含量并没有显著性差异。这很可能是由于雷竹林施用的磷肥经分解后主要以易溶解的磷酸盐形态存在, 在集约经营前期释放的磷酸盐可与土壤中的 Fe、Al、Ca、Mg 等离子结合形成难溶性磷, 而经营后期这些离子表面的吸附位点逐渐饱和, 另外, Fe、Al 等离子在经营过程中没有补充途径, 导致后面施入的大量磷肥难以被固定^[35-38]。由此可见, 在集约经营过程中每年进入土壤的磷肥大多都转化为活性磷和中稳性磷, 这也意味着雷竹林地磷流失风险在逐年增加。因此, 在不影响雷竹产量的情况下, 控制雷竹林地化肥施入量既可以减少农业生产成本, 又能缓解土壤酸化, 是保证雷竹林土壤可持续利用、减少环境污染风险的重要措施。

4 结论

(1) 长期集约经营过程中, 每年大量施用磷肥急剧提高了上、下层土壤全磷和有效磷含量, 同时也显著增加了其活性和中稳性磷含量, 但难溶性磷含量无显著性变化, 总体积累情况表现为: 上层土壤 > 下层土壤。与经营 3 年时相比, 经营 15 年后上层土壤活性磷和中稳性磷占总磷百分比提高了 63% 和 88%, 而难溶性磷占总磷百分比降低了 55%, 下层土壤中活性磷和中稳性磷占总磷比例提高了 83% 和 128%, 难溶性磷占总磷比例则降低了 56%。

(2) 长期集约经营造成雷竹林土壤磷存在超量累积的现象, Mehlich-3 P-H₂O-P 拟合方程推测上、下层土壤均可能已发生磷酸盐流失, 因此, 在雷竹林施肥管理过程中应注意合理施肥, 以免造成施肥后土壤磷随降雨通过地表径流流失, 从而污染周围水体。

参考文献:

- [1] 陈志豪, 梁雪, 李永春, 等. 不同施肥模式对雷竹林土壤真菌群落特征的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1168-1176.
- [2] 吴家森, 许开平, 叶晶, 等. 不同施肥条件下雷竹林水溶性有机碳氮的流失特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1): 128-133.
- [3] 吴士文, 索炎炎, 梁钢, 等. 集约经营下南方竹园土壤酸化特征与缓冲容量研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1120-1125.
- [4] 陈裴裴, 吴家森, 郑小龙, 等. 不同施肥对雷竹林渗漏水中可溶性有机碳、氮流失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1303-1310.
- [5] 韩晓飞, 谢德体, 高明, 等. 紫色土减磷配施有机肥的磷肥效应与磷素动态变化[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 207-213.

- [6] 陈闻, 吴家森, 姜培坤, 等. 不同施肥对雷竹林土壤肥力及肥料利用率的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(5): 1021-1028.
- [7] 吴家森, 姜培坤, 盛卫星, 等. 雷竹集约栽培对周边河流水质的影响[J]. 林业科学, 2009, 45(8): 76-81.
- [8] 刘侯俊, 陈红娜, 王俊梅, 等. 长期施肥对棕壤铁形态及其有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 36-43.
- [9] 许开平, 吕军, 吴家森, 等. 不同施肥雷竹林氮磷径流流失比较研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 31-34.
- [10] 吴建军, 李娟, 李荣斌, 等. 施肥措施及灌木缓冲带对雷竹林不同形态磷流失及雷笋产量的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 53-58.
- [11] 黄芳, 金炳华, 孙达, 等. 集约经营雷竹林序列的土壤磷素含量与组分[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 347-355.
- [12] 孙达, 黄芳, 蔡荣荣, 等. 集约经营雷竹林土壤磷素的时空变化[J]. 浙江农林大学学报, 2007, 24(6): 670-674.
- [13] Sui Y, Thompson M L, Shang C. Fractionation of phosphorus in a mollisol amended with biosolids [J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(5): 1174-1180.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] Adeloju S, Webb B, Smernik R. Phosphorus distribution in soils from Australian dairy and beef rearing pastoral systems [J]. Applied Sciences, 2016, 6(2): 31.
- [16] Kantek K, Korzeniowska J. The usefulness of Mehlich 3 and 1 M HCl extractant to assess copper deficiency in soil for environmental monitoring purpose [J]. Ochrona Srodowiska I Zasobow Naturalnych, 2013, 24(3): 1-5.
- [17] Singh M, Reddy K S, Singh V P, et al. Phosphorus availability to rice (*Oriza sativa* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) in a Vertisol after eight years of inorganic and organic fertilizer additions [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(7): 1474-1481.
- [18] 张永春, 汪吉东, 沈明星, 等. 长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 465-472.
- [19] 徐祖祥, 祝小祥, 徐进, 等. 临安雷竹林施肥现状及问题的分析[J]. 农学学报, 2015, 5(5): 53-56.
- [20] 孙晓, 庄舜尧, 刘国群, 等. 集约经营下雷竹林土壤酸化的初步研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1339-1343.
- [21] 刘国群. 无定形铝氧化物对雷竹土壤有机质矿化的影响[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(4): 626-628.
- [22] 王改玲, 李立科, 郝明德. 长期施肥和秸秆覆盖土壤活性有机质及碳库管理指数变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 20-26.
- [23] 杨萌, 岳天, 李永夫, 等. 常绿阔叶林改造为板栗林对土壤氮磷钾库及酶活性的影响[J]. 自然资源学报, 2017, 32(5): 765-777.
- [24] 李渝, 刘彦伶, 张雅蓉, 等. 长期施肥条件下西南黄壤旱地有效磷对磷盈亏的响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2321-2328.