

集约经营雷竹林土壤磷素的时空变化

孙 达¹, 黄 芳¹, 蔡荣荣¹, 秦 华¹, 庄舜尧², 张妙仙^{1,2}, 曹志洪^{1,2}

(1. 浙江林学院 环境科技学院, 浙江 临安 311300; 2. 中国科学院南京土壤研究所 浙江林学院森林与土壤联合实验室, 浙江 临安 311300)

摘要: 2006 年, 在雷竹 *Phyllostachys praecox* 主产区浙江省临安市三口镇, 选取集约经营下不同栽植年限(1, 5, 10, 15 a) 的雷竹林以及与未栽雷竹的邻近水田(0 a) 采集土样, 旨在分析集约经营雷竹林土壤磷素随雷竹栽植年限和剖面深度的时空变化规律, 以便为雷竹林土壤的可持续利用提供依据。研究表明: 雷竹林土壤磷素随栽植年限增长而增加。0, 1, 5, 10 和 15 a 的 10~20 cm 土层全磷质量分数分别是 0.39, 0.58, 0.58, 0.85 和 1.57 g·kg⁻¹; 有机磷质量分数为 130.16, 179.83, 183.61, 209.46 和 262.79 mg·kg⁻¹; 有效磷为 6.78, 17.41, 33.49, 100.64 和 326.36 mg·kg⁻¹。土壤中的全磷和有机磷随着栽植年限的增长而稳步上升; 速效磷则随着栽植年限的增加而急剧上升。但有机磷占全磷的比例较小并随着栽植年限的增加而更趋下降, 表明累积的磷素主要来自大多数还没有被利用而残留的无机磷肥, 有机覆盖物对土壤磷素累积的贡献不大。雷竹林土壤全磷、有机磷和有效磷在剖面深度上的分布总体上是随深度的加深而逐渐减少: 即表层(0~10 cm) > 亚表层(10~20 cm) > 底层(20~40 cm)。然而在 10 a 以前, 土壤全磷呈现两头高而中间低的分布态势, 1~15 a 的土壤有效磷和有机磷均呈现从表层到底层逐渐减少的趋势, 其幅度随着栽植年限的增加而扩大。集约经营模式虽然有较高的经济效益, 但土壤中大量磷素的累积既是资源的浪费又对环境具有潜在的威胁, 应调整施肥措施和配方。图 3 参 20

关键词: 土壤学; 集约经营; 雷竹林; 土壤磷素; 时空变化

中图分类号: S714.2

文献标志码: A

雷竹 *Phyllostachys praecox* 为禾本科 Gramineae 优良栽培笋用竹种, 主产于浙江临安、安吉、德清等县(市), 江苏、安徽、江西、上海等省市也有少量分布^[1]。由于雷竹笋有极高的经济价值和营养价值, 使得人们对其丰产栽培技术、生物学特性研究甚广。大量施肥冬季覆盖增温, 促进雷笋早出高产的技术——集约经营模式^[2], 使雷竹笋提前在春节前上市, 既增加了产量又提高了品质, 使竹农的经济效益大幅度上升。迄今, 对集约经营下雷竹林土壤养分变化的报道不多, 之前进行了土壤有机质变化的研究^[3], 而磷素的变化也只有零星报道^[4,5]。笔者对集约经营下的雷竹林土壤磷素进行了系统的调查, 试图通过分析不同种植年龄的雷竹林土壤磷素的质量分数, 以及在土壤剖面不同深度的磷素的分布, 揭示磷素的时空演变规律, 为雷竹林地的可持续利用提供理论依据。

收稿日期: 2006-12-22; 修回日期: 2007-07-24

基金项目: 中国科学院南京土壤研究所所长基金资助项目(ISSAS-IP-0601)

作者简介: 孙达, 硕士研究生, 从事土壤资源与生态环境研究。E-mail: sddj_725@163.com。通信作者: 曹志洪, 研究员, 从事土壤质量与环境安全研究。E-mail: zhcao@issas.an.cn

1 样地与方法

1.1 样区的自然条件

样地设在浙江省临安市三口镇葱坑村, 是我国雷竹的主产区 and 最早栽培区之一, $30^{\circ}14'N$, $119^{\circ}42'E$, 海拔为150 m。该地属中纬度北亚热带季风气候, 年降水量为1 460 mm, 平均气温为15.8 $^{\circ}C$ 。红壤性水稻土, 由粉砂岩发育而来。丘陵地貌, 栽种雷竹前均为水田, 所采样地都在同一海拔高程。

1.2 采样与分析方法

采集了栽植年龄为1, 5, 10, 15 a 的雷竹林土壤剖面(本底均是水稻土)。与这些雷竹林相邻的水田剖面作为对照土壤(0 a)。每个剖面采集0~10, 10~20, 20~40 cm 共3 层土样, 4 次重复。

采集的土壤样品经风干、去杂和过筛后, 测定以下指标: 全磷、速效磷、有机磷、全氮、有机质、全钾和pH 值等。实验分析方法、误差标准等均参照鲁如坤主编的《土壤农业化学分析方法》^[6]。数据的处理采用Excel 和DPS 软件^[7]。

2 结果与分析

2.1 土壤磷素质量分数随雷竹栽植时间的变化

由图1 可知, 水田土壤表层和亚表层的全磷质量分数比雷竹林土壤的要低, 且存在显著差异, 说明过去15 a 中对雷竹林的肥料投入是远远大于对粮食作物的投入。以改种雷竹1 a 后的磷素为例, 各层土壤的全磷质量分数分别是水田的1.46, 1.48 和1.25 倍(图1), 有效磷分别是5.4, 2.6 和3.5 倍(图2), 而有机磷分别是1.15, 1.38 和1.68 倍(图3)。

雷竹林土壤全磷的质量分数在时间上的变化是随着雷竹栽植年限增长而呈上升趋势。以10~20 cm 土层为例, 栽植雷竹5 a 后土壤中的全磷质量分数, 比1 a 略有增加, 而10, 15 a 的雷竹林土壤全磷分别是1 a 雷竹林土壤的1.47 倍和2.71 倍, 存在显著差异。

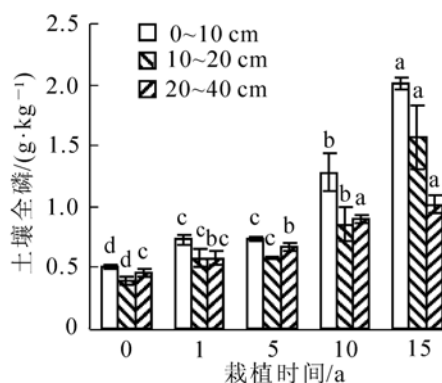


图1 雷竹林土层全磷质量分数随栽植时间的变化

Figure 1 Temporal variation of soil TP with the plantation years of *Phyllostachys praecox* stands

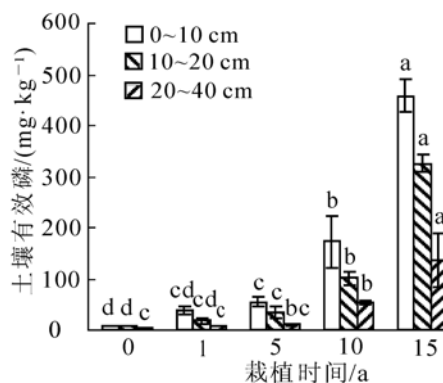


图2 雷竹林土层有效磷质量分数随栽植时间的变化

Figure 2 Temporal variation of soil Olsen P with the plantation years of *Phyllostachys praecox* stands

土壤有效磷是土壤磷库中对作物最为速效的部分, 能直接为作物吸收利用的无机磷或小分子量的有机磷组分, 因此是评价土壤供磷能力的重要指标。从图2 可以看出, 土壤有效磷质量分数随着雷竹栽植年限增长而表现出快速上升的趋势。以10~20 cm 土层为例, 5, 10, 15 a 雷竹林土壤有效磷分别是1 a 雷竹林土壤的1.92, 5.76 和18.75 倍, 均存在显著性差异。

土壤有机磷约占全磷的20%~70%^[9], 它的质量分数及变化情况对土壤供磷能力和植物磷素营养举足轻重。与无机磷相比, 有机磷具有在土壤中移动性大及被土壤组分吸附结合程度低的优点^[9]。从图3 可见, 各层土壤中有有机磷均呈逐年增加的趋势, 但是幅度不是很大。以10~20 cm 土层为例,

5, 10, 15 a 雷竹林土壤有机磷分别是 1 a 雷竹林土壤的 1.02, 1.14 和 1.26 倍, 1 与 5 a 之间不存在显著性差异, 但分别与 10 和 15 a 间存在显著性差异。

理论上认为, 从水田变为旱地栽植雷竹 1 a 之后, 土壤磷素有效性要比水稻土低, 数据却显示雷竹栽植 1 a 后的有效磷是水稻土的 2.6 倍, 反而迅速上升了, 而且有机磷的增加也较快。Wäger 等^[10]研究表明, 耕作方式的改变有助于有机磷的积累, 说明竹农对雷竹林地使用了大量的磷肥。水旱耕作对酸性土壤固磷强度和磷素释放影响甚大。根据土壤学的理论, 一般认为土壤在淹水后, 磷素的有效性会增加。其主要原因是 Fe-P 的转化: Fe^{3+} 还原使磷酸高铁还原为磷酸亚铁, 增加了磷盐的溶解性和磷的有效性^[11]。但笔者的研究结果与蔡崇法等^[12]报道的水田改旱地后土壤有效磷质量分数也大于水田的结果是吻合的。

雷竹建园最初 1~3 a 内立竹密度比较稀疏, 竹笋也都用来留养母竹^[13], 因此, 在雷竹栽植 1~5 a 磷素变化不大。5 a 以后, 雷竹林进入成园期, 磷素的增加除了与施肥量增加有较大关系外, 还与枯落物的大量增加和土壤生物对磷的活化作用的增强有密切关系, 土壤生物通过酸化周围环境对磷产生活化作用^[11]。雷竹的落叶以及其他一些生物残体在其降解过程中都能增加土壤磷的有效性。另外, 王伯仁等^[14]对红壤磷组分的研究表明, 长期施磷, 特别是磷肥和有机肥配施能明显提高土壤全磷、有机磷的质量分数。因此, 在 5 a 后全磷、有效磷均表现为急剧上升, 有机磷也有一定程度的上升。另外一个原因是, 从 5 a 开始竹农对雷竹林地采用冬季地表覆盖的技术, 使得 10 和 15 a 的土壤全磷和速效磷的质量分数与 5 a 存在显著差异。另外, 增加土壤有机质含量, 可以增加土壤有机磷总量^[15]。免耕覆盖处理中, 有机磷的质量分数相对较高^[9]。在笔者的实验中, 雷竹林进行大量覆盖, 土壤的 pH 值从 5.47 下降到 4.32, 土壤表层有机质从 $25.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 上升到 $79.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有机磷则从 $202.05 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ 上升到 $422.48 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与裴海昆^[16]、曾亮等^[15]的研究相吻合, 但结果表明, 所有土层的有机磷占全磷的比例均较小, 并有随着栽植年限的增加而更趋下降。磷肥的化学性质决定施肥总量约 75%~90% 的磷被滞留在土壤中^[17]。长期大量的施肥和每年的覆盖物、枯落物以及施用的厩肥等有机肥是磷素增加的重要影响因素。

2.2 雷竹林土壤磷素质量分数随土层深度的空间变化

从图 1 可见, 除 15 a 外, 所有年限雷竹林土壤剖面的各土层的全磷质量分数几乎都是随着土壤深度的增加而出现先减少后略增加的趋势, 即亚表层(10~20 cm)比表层(0~10 cm)有所减少, 而底层(20~40 cm)比亚表层(10~20 cm)有所增加。数据统计显示, 各剖面的亚表层土壤全磷显著地比其表层减少了 21%~33%; 底层土壤的全磷比亚表层的略有增加, 但其差异在统计上不显著。图 2 结果表明, 有效磷在 4 个不同栽植年份的雷竹林土壤剖面上均呈自上而下逐渐减少的分布规律, 即表层(0~10 cm) > 亚表层(10~20 cm) > 底层(20~40 cm)。土壤有效磷质量分数从表层到底层逐渐减少的幅度是随着栽植年限的增加而扩大。除 15 a 外, 有效磷从土壤表层到亚表层减少幅度较亚表层到底层减少的幅度要大。图 3 可见, 雷竹林土壤表层有机磷质量分数较高, 随着深度的增加, 有机磷则逐渐下降。与 Kitayama 等^[18]在不同海拔高度上土壤有机磷分布的研究结果相吻合。

正如前述, 这种变化与雷竹林的集约化管理模式有关。同时, 也与磷素在土壤中的化学行为有关: 磷素在土壤中迅速被红壤胶体、黏粒、铁铝氧化物所固定, 移动性很小, 随径流流失和淋洗迁移的数量也都很少等^[19]。导致土壤中累积的磷量越来越大, 又使其在剖面上呈现出不同的分配数量。

雷竹林每年施肥 3 次, 主要施在表层, 磷素被表土固定, 富集于土壤表层。亚表层土壤是雷竹竹鞭和笋活动最强的土层, 也是土壤微生物活动最强的地方, 对磷的活化作用也较强, 增加了土壤磷的有效性和移动性。而且其中一次施肥还将其深翻入土 10~20 cm, 使土壤的物理环境如土壤孔隙状况

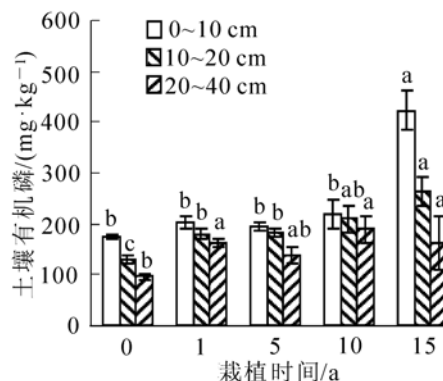


图 3 雷竹林土层有机磷质量分数随栽植时间的变化

Figure 3 Temporal variation of SOP with the plantation years of *Phyllostachys praecox* stands

及相应的通气状况等发生变化, 这些变化可以促使好氧土壤微生物活动量增加, 扰动可在一定程度上释放土壤中的磷^[20], 使得亚表层的有效磷有一些增加, 但是还是比表层的有效磷要低得多, 下降幅度大。另外, 土壤亚表层中大部分有效磷由雷竹及雷笋携带离开了土体或被移动到底层, 是其全磷和有效磷偏低的原因。而底层土壤没有亚表层那样活动强烈的竹鞭和雷笋, 因此带出的磷量比较少, 同时还能接受上层下移的磷素, 使得底层的全磷反而略高于亚表层, 呈现了两头大中间小的规律。一般来说, 磷在土壤中的扩散系数极小, 但耕作措施对磷素剖面分布有一定的影响, 加之土壤微生物和作物根系分泌物的作用, 使土壤有机磷在各土壤层次间呈现不同的分布规律^[9]。研究表明, 表层0~10 cm 的有机磷质量分数在雷竹各栽植年限上都是最高的。

3 结论与展望

笔者揭示了集约经营的雷竹林栽植15 a 的土壤全磷、有机磷和有效磷的时空变异规律。大量施用复合肥以及冬季使用大量有机物覆盖等集约经营措施导致了全磷、有机磷和有效磷都随栽植年限的增加而不断提高。特别是在栽植10 a 后累积速度和强度大大增加, 无论是全磷、有机磷, 还是有效磷, 随栽植年限而增加的幅度和速度均是随着栽植年限的延长而加强, 但是, 有机磷的增长速率相对比较缓慢, 因为累积的磷素主要是大量使用的无机磷肥的残留。雷竹林土壤全磷、有机磷和有效磷在剖面深度空间上的分布总体上都是随深度的加深而自上而下逐渐减少: 即表层(0~10 cm) > 亚表层(10~20 cm) > 底层(20~40 cm)。然而, 在栽植10 a 以前, 土壤全磷的的空间分布呈现两头高而中间低的分布状态。1~15 a 雷竹林土壤有机磷、有效磷质量分数从表层到底层逐渐减少, 下降幅度随着栽植年限的增加而扩大。雷竹林土壤中累积了如此高的磷, 导致与其他养分的不平衡, 可能对雷竹笋的产量和品质以及雷竹的生长存在负面影响。过高的土壤有效磷质量分数降低了雷笋中游离氨基酸的含量而使食用品质下降, 还会促进雷竹提前开花早衰, 导致雷竹植株过多地吸收磷素而减少对锌、铁、锰和硅等元素的吸收而影响雷竹的健康生长等^[4]; 笔者研究发现, 15 a 雷竹林表土有效磷大于400 ng kg⁻¹, 有机磷也大于400 ng kg⁻¹, 显然对周边水体环境质量有巨大威胁。如何防治和排除这种威胁是应立即开展研究的问题。建议在雷竹主产区大力开展测土施肥, 做到平衡施肥, 减少磷肥的使用或停几年再用。这既可减少竹农的成本投入, 又能保护环境, 实现雷竹生产的可持续发展。

致谢: 得到姜培坤、徐秋芳、钱新标、吴家森、杨芳、王纪杰、鄢奇峰、林天、盛卫星等老师和学友以及黄文荣先生的指点和帮助。在此向他们一并表示诚挚的感谢。

参考文献:

- [1] 方伟, 何均潮, 卢学可, 等. 雷竹早产高效栽培技术[J]. 浙江林学院学报, 1994, **11** (2): 121-128.
- [2] 汪祖潭, 方伟, 何均潮, 等. 雷竹笋用林高产高效栽培技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995: 5-30.
- [3] 蔡荣荣, 黄芳, 孙达, 等. 集约经营雷竹林土壤有机质时空变化[J]. 浙江林学院学报, 2007, **24** (4): 450-455.
- [4] 姜培坤, 俞益武, 金爱武, 等. 丰产雷竹林地土壤养分分析[J]. 竹子研究汇刊, 2000, **19** (4): 50-53.
- [5] 杨芳, 徐秋芳. 不同栽培历史雷竹林土壤养分与重金属含量的变化[J]. 浙江林学院学报, 2003, **20** (2): 11-14.
- [6] 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: 146-226.
- [7] 唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其计算机处理平台[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 15-70.
- [8] 李孝良, 于群英, 陈如梅. 土壤有机磷形态的生物有效性研究[J]. 土壤通报, 2003, **34** (2): 99-101.
- [9] 海龙, 王平, 张仁陟, 等. 不同耕作方式对土壤有机磷形态的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2006, **41** (5): 95-99.
- [10] WAGER B I, STEWART J W B, MOIR J O. Changes with time in the form and availability of residual fertilizer phosphorus on Chernozemic soils [J]. *Can J Soil Sci*, 1986, **66**: 115-119.
- [11] 邱燕, 张鼎华. 南方酸性土壤磷素化学研究进展[J]. 福建稻麦科技, 2003, **21** (3): 14-17.
- [12] 蔡崇法, 陈家宙, 王长荣, 等. 鄂南红壤丘陵区种植结构调整对土壤养分的影响[J]. 土壤与环境, 2001, **10** (1): 47-50.
- [13] 姜培坤, 周国模, 徐秋芳. 雷竹高效栽培措施对土壤碳库的影响[J]. 浙江林学院学报, 2002, **19** (6): 6-11.

- [14] 王伯仁, 徐明岗, 文石林, 等. 长期施肥对红壤旱地磷组分及磷有效性的影响[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2002, **28** (4): 293–297.
- [15] 曾亮, 黄启为, 黎星辉, 等. 湖南省酸性旱土有机磷组分分级及生物有效性研究[J]. 西南农业学报, 2004, **17** (增刊): 239–243.
- [16] 裴海昆, 朱志红, 乔有明, 等. 不同草甸植被类型下土壤腐殖质及有机磷类型探讨[J]. 草业学报, 2001, **10** (4): 18–23.
- [17] 王庆仁, 李继云. 论合理施肥与土壤环境的可持续性发展[J]. 环境科学进展, 1999, **7** (2): 116–123.
- [18] KITAYAMA K, MAJALAP-LEE N, AIBA S. Soil phosphorus fractionation and phosphorus-use efficiency of tropical rain forests along altitudinal gradients of Mount Kinabalu, Borneo [J]. *Oecologia*, 2000, **123**: 342–349.
- [19] 曹志洪, 林先贵. 太湖流域主水间的物质交换与水环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [20] 张志剑, 王珂, 朱荫湄, 等. 水稻田表水磷素动态特征及其潜在环境效应的研究[J]. 中国水稻科学, 2002, **14** (1): 55–57.

Temporal and spatial variation of soil phosphorus in *Phyllostachys praecox* stands under intensive cultivation management

SUN Da¹, HUANG Fang¹, CAI Rong-rong¹, QIN Hua¹, ZHUANG Shun-yao²,
ZHANG Mao-xian^{1 2}, CAO Zhi-hong^{1 2}

(1. School of Environmental Sciences and Technology, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China;
2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science and Zhejiang Forestry College Joint Laboratory of Forest Soil and the Environment, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: In 2006, we investigated and sampled soils in the main production area of *Phyllostachys praecox* stands, namely Sankou town, Lin'an city, choosing 1, 5, 10, 15 years plantation of bamboo stands (the paddy soil nearby as the beginning soil of *Phyllostachys praecox* stands as a check) and each by 4 replications. The objective of this study is to analyse the temporal and spatial variation of soil P along with planting years and the profile depth in *Phyllostachys praecox* stands during last 15 years under very intensive management models (very heavy fertilizer application yearly and heavy winter organic mulch started after 5 plantation years). Results indicated that, with the prolonging plantation time, the soil P content increased significantly ($P < 0.05$). Soil P content in sub surface layer of 10–20 cm were gradually increased from 0 to 15 years, total P (TP) were 0.39, 0.58, 0.58, 0.85 and 1.57 g·kg⁻¹ respectively, soil organic P were 130.16, 179.83, 183.61, 209.46 and 262.79 mg·kg⁻¹ respectively, and soil available P (Olsen P) were 6.78, 17.41, 33.49, 100.64 and 326.36 mg·kg⁻¹ respectively. The soil Olsen P content rose more rapidly than others with the prolonging plantation time, especially the accumulation velocity and intensity after 10 years. The results indicated that the phosphorus fertilizer was much exceeded which it was needed by *Phyllostachys praecox* stand. The soil TP, organic P and Olsen P content decreased with the profile depth increase as a whole. However, before the 10 years, the soil TP content was higher at surface and bottom layers, and lower in the middle of sub-surface layer. The soil Olsen P and organic P content from 1 to 15 years had reduced gradually from surface to bottom layers and the reducing rate was expanded with the plantation time. The highly accumulation of TP and Olsen P in the stand soil not only is a big waste of valuable P resources, but also is a potential danger of pollution to its surrounding's water body. We should adjust the management of fertilization in order to save the prime cost, achieve a high yield and protect environment. [Ch, 3 fig. 20 ref.]

Key words: pedology; intensive management; *Phyllostachys praecox* stand; soil phosphorous; temporal and spatial variation