

王文蕾,王旭,朱美玲,等.海南吊罗山自然保护区土壤磷研究[J].江苏农业科学,2017,45(6):273-277.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.06.070

海南吊罗山自然保护区土壤磷研究

王文蕾¹,王旭^{1,2},朱美玲¹,林灯¹,梁卿雅¹,邹耀进¹,李超¹,王鑫瑶¹,吴挺芳³,王春新³

(1.海南大学环境与植物保护学院,海南海口 5702282;

2.农业部儋州热带农业资源与生态环境重点野外科学观测试验站,海南儋州 571737;

3.海南吊罗山国家级自然保护区,海南陵水 572433)

摘要:以海南吊罗山自然保护区 4 种类型森林(热带山地雨林原始林、热带山地雨林次生林、热带低地雨林原始林、热带低地雨林次生林)为研究对象,分析其土壤磷含量、氮磷比及磷密度分布情况,以期揭示土壤全磷分布特征,估算土壤磷储量。结果表明:(1)各样地土壤全磷含量平均值在剖面垂直分布上随土壤深度增加而减少,而同样地全磷在土壤剖面无明显分布规律。(2)土壤氮磷比随土壤深度增加而降低,全磷、全氮、氮磷比均为中等变异。(3)不同样地土壤磷密度相差很大,介于 130.07~442.69 g/m² 之间。(4)4 种类型森林土壤磷含量总体上呈现随土壤深度增加而降低的趋势,不同类型森林同一土层土壤磷含量存在差异。吊罗山土壤平均全磷含量为 0.192 g/kg,0~100 cm 土层土壤磷储量平均值为 21.5 t/hm²。(5)吊罗山土壤磷含量空间异质性中等,4 种森林 0~50 cm 土层的磷密度贡献率变化范围为 53%~56%,0~50 cm 土层与 50~100 cm 土层的磷密度贡献率相差不大。

关键词:土壤;磷含量;氮磷比;磷密度;吊罗山

中图分类号:S714 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2017)06-0273-04

热带雨林动植物种类丰富、结构复杂,具有强大的生态系统功能,在气候调节、水土保持、生物多样性保护等方面发挥着重要作用。森林土壤不仅为植物提供生存环境,也为其提供生长发育所必需的水分、营养等。森林土壤养分是否充足将直接影响林木的生长发育状态。磷是土壤养分的重要组成部分,不仅是植物生长发育所必须的大量营养元素,也是限制植物生长发育的因素之一,尤其在热带雨林生态系统表现更明显^[1]。植物所利用的磷素,主要来源于土壤,它是组成植物体许多化合物的重要成分,在植物体生长和代谢过程中发挥着不可替代的作用^[2],磷不仅具有促进树皮再生、根系生长、树围增大以及提高林木种子产量的功能,还具有增进植物抗病性、抗寒性、抗旱性的能力^[3]。土壤环境中较低的磷含量会导致树木对土壤营养吸收和贮备不足,将直接影响林木的生长发育^[4]。在多数生态系统中,土壤氮磷比是影响植被空间分布差异的主要原因,作为一个数字变量,氮磷比可反映氮磷元素对植物生长限制的转化梯度和趋势,明确植物群落或植物的生产力主要受到哪种养分元素的限制作用。

国内外对土壤全磷和有效磷的研究报道很多。针对磷素

分级、磷素形态、磷的生物有效性及其影响因素^[5-7]、吸附-解吸^[8-10]的研究较多,还有大量磷素释放^[11]、磷素利用效率^[12]等的研究报道。严加亮对武夷山不同海拔土壤磷素的空间异质性进行了研究^[13],黄永涛等对海南岛霸王岭 4 种热带森林类型林地土壤养分状况进行了比较分析^[14],针对天然林磷素的分布特征及储量等方面的研究相对较少。

近年国内对土壤氮磷比也有研究,赵如金等对北固山湿地土壤氮磷的空间分布特征进行了研究^[15],陈思宇等对甘南高原土壤氮磷比空间异质性进行了研究^[16],刘雯霞等对青藏高原东缘高寒草甸不同功能群植物氮磷化学计量特征进行了研究^[17]。

本研究以海南吊罗山自然保护区 4 种类型森林为研究对象,分析其土壤全磷含量、密度及氮磷比,揭示吊罗山自然保护区土壤全磷的分布规律,为森林土壤养分管理及森林土壤质量评价提供基础数据。

1 研究区概况

吊罗山自然保护区是我国原始热带雨林区之一,位于海南省东南部 18°40'~18°58' N、109°45'~110°3' E,地跨五指山、保亭、琼中、万宁、陵水等 5 个市(县)。该地区属于热带海洋季风气候区,年平均气温为 24.6℃,最冷月(1月)平均气温为 15.3℃,最热月(7月)平均气温为 28.4℃,多年平均降水量为 2 160 mm,年均相对湿度为 85.9%,具有明显的干湿季气候特征,5—10 月是雨季,11 月到次年 4 月为旱季。保护区内地形复杂,坡度为 50°~60°。成土母质为花岗岩闪长岩,土壤质地主要为山地黄壤与沙质红壤。

2 研究方法

2.1 样地设置

综合考虑吊罗山地区的地理环境、植被类型占比和空间

收稿日期:2016-02-04

基金项目:国家自然科学基金(编号:31260109);中国科学院战略性先导科技专项(编号:XDA05050206、XDA05050302);中西部高校项目(编号:ZXBJH-XK004、ZXBJH-XK005、MWECSP-RT08);国际科技合作计划(编号:2007DFA31070/02);海南省教育厅重点项目(编号:key project Hjkj2012-03);海南省研究生创新科研课题(编号:Hys2014-13)。

作者简介:王文蕾(1991—),女,内蒙古赤峰人,硕士,主要从事热带林生态学研究。E-mail:771532813@qq.com。

通信作者:王旭,博士,副教授,主要从事生态学、环境工程、森林培育学研究。E-mail:75194718@qq.com。

分布情况以及调查采样的可实施性,确定本次研究包括 4 种森林类型:热带低地雨林原始林、热带低地雨林次生林、热带山地雨林原始林、热带山地雨林次生林,共设置了 15 块样地(50 m×50 m),样地基本概况如表 1 所示。

表 1 吊罗山自然保护区样地概况

样地	经度(N)	纬度(E)	海拔(m)	森林类型	植被类型	土壤类型
1	18°46'12"	109°56'10"	475	热带低地雨林次生林	常绿落叶阔叶混交林	山地黄壤
2	18°40'44"	109°56'51"	250	热带低地雨林次生林	常绿阔叶林	赤红壤
3	18°40'44"	109°56'53"	245	热带低地雨林次生林	常绿阔叶林	赤红壤
4	18°41'05"	109°54'37"	270	热带低地雨林次生林	常绿阔叶林	赤红壤
5	18°41'51"	109°53'49"	395	热带低地雨林次生林	常绿阔叶林	赤红壤
6	18°40'18"	109°53'49"	255	热带低地雨林次生林	常绿落叶阔叶混交林	赤红壤
7	18°40'18"	109°53'38"	265	热带低地雨林次生林	常绿阔叶林	赤红壤
8	18°40'30"	109°52'26"	515	热带低地雨林次生林	常绿阔叶林	山地黄壤
9	18°41'11"	109°51'08"	555	热带低地雨林次生林	常绿阔叶林	山地黄壤
10	18°43'37"	109°50'20"	640	热带低地雨林原始林	常绿阔叶林	山地黄壤
11	18°43'07"	109°50'51"	750	热带山地雨林原始林	常绿阔叶林	山地黄壤
12	18°41'49"	109°52'42"	665	热带山地雨林次生林	常绿阔叶林	山地黄壤
13	18°43'50"	109°52'01"	940	热带山地雨林原始林	常绿阔叶林	山地黄壤
14	18°43'57"	109°51'41"	1 130	热带山地雨林原始林	常绿阔叶林	山地黄壤
15	18°43'40"	109°53'29"	935	热带山地雨林次生林	常绿阔叶林	山地黄壤

2.2 土壤样品采集

将每个样地按网格法分成 25 个 10 m×10 m 的大样方,随机选择 2 个大样方进行土壤调查。土壤调查分为土钻法和剖面法。土钻法取样过程:在所选择的每个 10 m×10 m 的大样方中各随机设置 3 个 2 m×2 m 的小样方,每个小样方内,按 0~10、10~20、20~30、30~50、50~100 cm 分层取土样,将 3 个小样方的同层次土壤组成该大样方该层次混合样品,带回实验室。剖面法采样过程:选择一个受人为干扰较少、可代表该大样方植被结构和土壤类型的地段,挖取 1 个 1 m×1 m×1 m 的土壤剖面,用环刀按 0~10、10~20、20~30、30~50、50~100 cm 分层取样,每层各取 3 个土壤样品,分别称鲜质量并记录,带回实验室。

2.3 土壤样品处理

将土钻法取得的样品放在牛皮纸上,自然风干,并去除根系、动植物残体、石块等杂物,采用四分法取约 500 g 样品,磨碎过 2 mm 筛,装袋备用。剖面法取得的样品放入烘箱烘干称质量并记录。土钻法获得的土壤样品用于土壤总磷及总氮的测定,剖面法获得的土壤样品用于土壤容重的测定。

2.4 土壤样品分析方法

采用氢氧化钠碱溶-钼锑抗比色法测定土壤全磷,采用半微量开式法测定土壤全氮,筛分法测定粒径大于 2 mm 砾石的含量^[18]。

2.5 土壤全磷密度计算方法

土壤全磷密度(STP_i)是指单位面积一定深度的土层土壤磷储量,某土层(i)土壤全磷密度计算公式如下:

$$STP_i = P_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i) / 100。$$

式中: P_i 为土壤全磷含量(g/kg), D_i 为土壤容重(g/m³); E_i 为土壤厚度(cm); G_i 为直径大于 2 mm 的砾石所占体积百分比(%)。

某一土壤剖面全磷密度为该剖面各层 STP_i 之和,即: $STP = \sum STP_i$ 。

2.6 数据统计与分析

采用 Excel 2007 对数据进行处理以及图表制作。

3 结果与分析

3.1 吊罗山自然保护区森林土壤全磷含量特征

由图 1 可知,各样地、不同土层的磷含量介于 80~460 mg/kg 之间,最小值出现在 2 号样地的 50~100 cm 土层,最大值出现在 8 号样地的 0~10 cm 土层。0~10、10~20、20~30、30~50、50~100 cm 5 个土层的土壤全磷含量平均值分别为 240、210、190、170、170 mg/kg,由此可见,吊罗山自然保护区各样地土壤全磷含量平均值在剖面垂直分布上呈现随土壤深度增加而减少的规律。各样地土壤全磷含量差别较大,同一样地、不同土层间土壤全磷含量也无明显的分布规律,这表明吊罗山自然保护区土壤全磷含量有一定的时空差异性,这与范美莉等对海南琼中橡胶林土壤磷储量研究结果^[3]基本一致。在自然森林生态系统中,土壤全磷主要来自成土母质,因此这可能是土壤风化、淋溶作用强度的差异所致^[14]。

3.2 吊罗山自然保护区土壤氮磷比分布特征

将各样地土壤全磷、全氮以及氮磷比进行统计学分析,用平均值表示样本中心趋向的分布,用标准偏差和变异系数表示样本的变异程度。结果(表 2)表明,土壤氮磷比均随土壤深度的增加而降低。变异系数(CV)反映系统空间变异性的 大小,一般情况下,CV≤0.01 时表示样本的变异性较弱,0.01<CV≤1 时表示样本的变异性中等,CV≥1 时表示样本变异性较强,从表 2 可知,土壤全氮、全磷、氮磷比均为中等变异。全磷、氮磷比的变异程度均呈现出波动趋势,而全氮的变异程度呈现出先增加后减少的趋势,不同土层间氮磷比变化不大。

3.3 吊罗山自然保护区森林土壤全磷密度

由图 2 可知,各样地土壤全磷密度相差较大,15 块样地

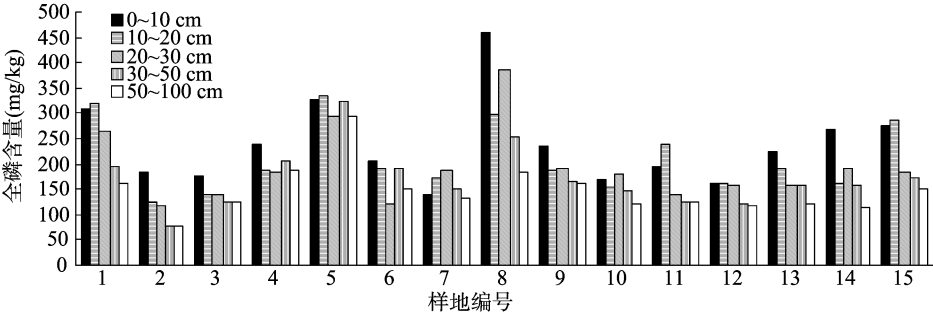


图1 吊罗山自然保护区土壤全磷含量

表 2 吊罗山土壤养分统计结果

类型	土层 (cm)	平均值	标准偏差	变异系数
全磷 (g/kg)	0 ~ 10	0.238	0.082	0.344
	10 ~ 20	0.210	0.068	0.325
	20 ~ 30	0.193	0.072	0.371
	30 ~ 50	0.171	0.059	0.344
	50 ~ 100	0.148	0.050	0.335
全氮 (g/kg) ^[20]	0 ~ 10	2.200	0.718	0.326
	10 ~ 20	1.558	0.606	0.389
	20 ~ 30	1.229	0.538	0.438
	30 ~ 50	0.952	0.471	0.495
	50 ~ 100	0.728	0.302	0.415
氮磷比	0 ~ 10	9.997	3.911	0.391
	10 ~ 20	7.780	2.505	0.322
	20 ~ 30	6.899	3.262	0.473
	30 ~ 50	6.114	2.640	0.432
	50 ~ 100	5.291	1.967	0.372

全磷密度介于 130.07 ~ 442.69 g/m² 之间,2 号样地土壤全磷密度最低,5 号样地土壤全磷密度最高。吊罗山自然保护区各样地土壤全磷密度平均值为 231.85 g/m²。

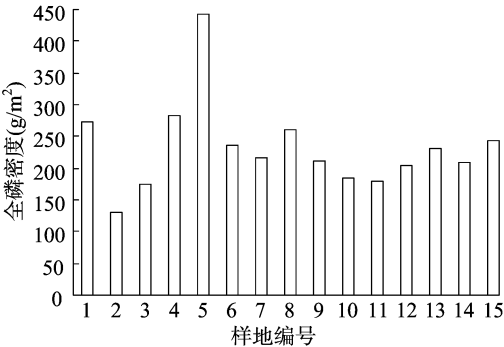


图2 吊罗山自然保护区土壤全磷密度

3.4 不同森林类型土壤磷含量和磷密度的比较分析

3.4.1 土壤磷含量研究 由图 3 可知,4 种森林类型土壤磷含量整体上呈现随土壤深度增加而降低的趋势。各类型森林同一土层土壤磷含量不同,由于不同森林类型优势物种、群落结构等不同,不同物种对磷的吸收利用能力不同,因此可能导致土壤磷含量的差异。热带低地雨林次生林、热带山地雨林次生林土壤磷含量垂直变化明显,均随着土壤深度的增加而降低。2 种森林类型表层土壤磷相对较高,可能是因为随着枯枝落叶的分解,植物吸收利用的磷重新归还到土壤表层,在

土壤表层呈现磷的相对富集。热带低地雨林原始林土壤磷含量在 20 ~ 30 cm 土层出现最大值,热带山地雨林原始林土壤磷含量在 10 ~ 20 cm 土层出现最大值,可能与这 2 种类型森林土壤全磷易向下淋洗有关^[4]。

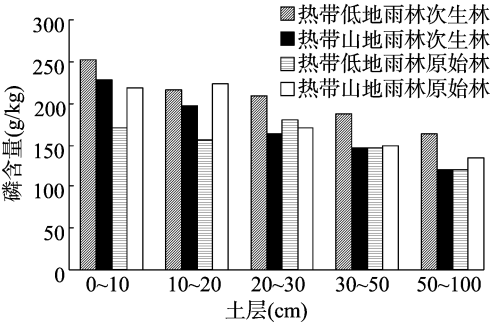


图3 4 种森林类型土壤磷含量

3.4.2 土壤磷密度研究 为了更好地比较 4 种类型森林不同土层磷密度,各土层仅计算 10 cm 厚土壤磷密度。由图 4 可知,热带低地雨林次生林土壤磷密度介于 23.33 ~ 28.13 g/m² 之间,热带山地雨林次生林土壤磷密度介于 19.42 ~ 31.04 g/m² 之间,热带低地雨林原始林土壤磷密度介于 15.94 ~ 22.32 g/m² 之间,热带山地雨林原始林土壤磷密度介于 18.26 ~ 25.51 g/m² 之间。热带低地雨林次生林和热带山地雨林原始林土壤磷密度随土壤深度增加而降低。热带山地雨林次生林各层土壤的磷密度从大到小排序为 10 ~ 20 cm > 20 ~ 30 cm > 0 ~ 10 cm > 30 ~ 50 cm > 50 ~ 100 cm,热带低地雨林原始林各层土壤的磷密度从大到小排序为 20 ~ 30 cm > 30 ~ 50 cm > 0 ~ 10 cm > 10 ~ 20 cm > 50 ~ 100 cm。

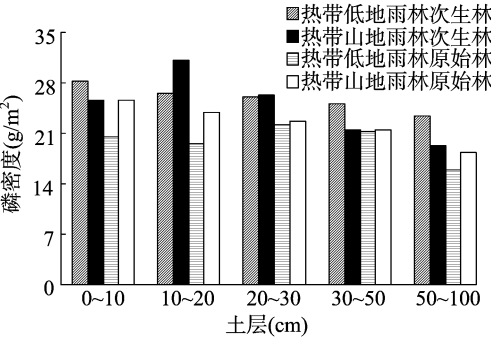


图4 4 种森林类型土壤磷密度

由图 3 和图 4 可知,4 种森林类型中,只有热带低地雨林次生林的土壤磷含量和磷密度随土壤深度增加而降低,说明

热带低地雨林次生林土壤状况相似,土壤质地、结构变化较小。其他3种类型土壤状况有差异,土壤质地、结构变化较大。

3.4.3 0~100 cm 土层磷密度研究 由图5可知,4种森林类型中,0~100 cm 土层磷密度最高的为热带低地雨林次生林(247.58 g/m²),其次为热带山地雨林次生林(223.15 g/m²),再次为热带山地雨林原始林(206.25 g/m²),最低的为热带低地雨林原始林(184.52 g/m²)。0~10、0~20、0~30、0~50 cm 土层磷密度贡献率能反映土壤磷素的垂直分布^[16]。吊罗山4种类型森林0~10、0~20、0~30、0~50 cm 土层的贡献率依次分别为热带低地雨林次生林:11%、22%、33%、53%;热带山地雨林次生林:11%、25%、37%、56%;热带低地雨林原始林:11%、22%、34%、57%;热带山地雨林原始林:12%、24%、35%、56%,各土层对土壤磷素贡献率变化不大。

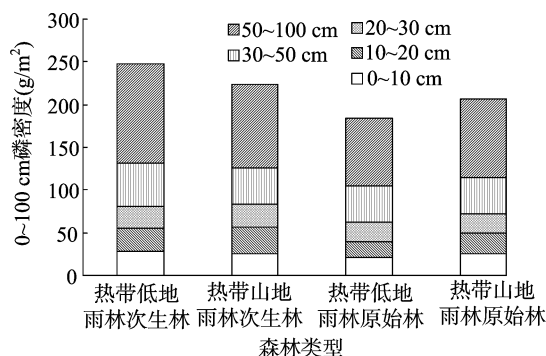


图5 4种森林类型土壤0~100 cm 层磷密度

4 结论与讨论

4.1 吊罗山自然保护区森林土壤全磷含量

吊罗山自然保护区内各样地土壤全磷含量在剖面垂直分布上呈现随土壤深度增加而减少的规律。而同一样地全磷在土壤剖面无明显分布规律,与范美莉等对海南琼中橡胶林土壤磷储量研究结果^[3]及干友民等对川西北亚高山草地不同退化梯度草地土壤养分变化的研究结果^[19]一致。

4.2 吊罗山土壤氮磷比分布特征

吊罗山自然保护区内各样地土壤氮磷比均随土壤深度的增加而降低,不同样地间土壤全氮、全磷、氮磷比均为中等变异。全磷、氮磷比的变异程度均呈现出波动趋势,而全氮的变异程度呈现出先增加后减少的趋势,不同土层间氮磷比变化不大。

4.3 吊罗山自然保护区森林土壤全磷密度

各样地土壤全磷密度分布规律不明显,存在较大差异,一方面可能由于土壤磷密度不仅与土壤磷含量有关,也与土壤物理性质有关,而不同样地的森林类型、植被类型、土壤类型不同,导致土壤物理性质的差异;另一方面也可能与不同样地森林受人类干扰程度不同有关。

4.4 4种类型森林土壤磷含量和磷密度研究

4种森林类型土壤磷含量总体上呈现出随土壤深度增加而降低的趋势。各森林类型同一土层土壤磷含量不同。4种森林土壤磷含量不同,一方面由于不同森林生物组成、生物量以及林内环境不同,动物及微生物残体存在差异,致使进入林

地土壤中有机的量不同;另一方面不同森林微生物活动、淋溶强度等不同^[20],都会导致磷含量不同。

吊罗山土壤全磷含量平均值为0.192 g/kg,远低于我国第2次土壤普查结果(全磷含量0.44~0.85 g/kg)^[13],可能是因为吊罗山自然保护区为天然林,受人为干扰较少,肥力多来自凋落物分解和母质层风化,全磷积累较少。植物所能直接利用的磷是速效磷,由于全磷量中土壤速效磷只占其中的极小部分,而且土壤中速效磷与全磷很多时候不具相关性,因此土壤全磷一般不能作为土壤磷素供应水平的确切指标^[21]。虽然土壤全磷含量的高低与植物磷素营养的关系不密切,全磷含量高时并不意味着磷素供应充足,但当全磷含量低于0.8 g/kg时,土壤常出现磷供应不足。研究区各样地土层全磷含量仅为0.183 g/kg,由此可知研究区土壤磷供应不足^[22-23]。

4种森林中,只有热带低地雨林次生林土壤磷含量和磷密度随土壤深度增加而降低。土壤磷储量平均值为21.5 t/hm²。

4.5 0~100 cm 土层磷密度研究

4种森林0~50 cm 土层的磷密度贡献率变化范围为53%~57%,可以看出0~50 cm 土层磷密度贡献率与50~100 cm 土层磷密度贡献率相差不大。由于土壤表层土与深层土全磷的差异主要是有效磷的差异,而有效磷一般集中在土壤表层,且占全磷比例小,因此0~50 cm 土层磷密度贡献率大于50~100 cm 土层,但二者相差不大。

致谢:感谢吊罗山刘海伟站长在采样过程中给予的帮忙与照顾;感谢实验室的旷春兰老师和杨照坤老师在实验仪器的用法等方面给予的指导;还要感谢李佳灵、张晓琳、王帅等在采样过程中的帮助。

参考文献:

- [1] 汪涛,杨元合,马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及其影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版),2008,44(6):945-952.
- [2] 赵均嵘. 杉木林生态系统转换对土壤磷形态的影响及其机制[D]. 福州:福建农林大学,2012.
- [3] 范美莉,王旭,吴志祥,等. 海南琼中橡胶林土壤磷储量研究[J]. 热带农业科学,2012,32(4):32-37.
- [4] 白翠霞. 北京八达岭森林土壤磷素研究[D]. 北京:北京林业大学,2006:16-17.
- [5] 来璐,郝明德,彭令发. 土壤磷素研究进展[J]. 水土保持研究,2003,10(1):65-67.
- [6] 孙桂芳,金继运,石元亮. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展[J]. 中国土壤与肥料,2011,2011(2):1-9.
- [7] 刘建玲,张风华. 土壤磷素化学行为及影响因素研究进展[J]. 河北农业大学学报,2000,23(3):36-45.
- [8] 赵庆雷,吴修,袁守江,等. 长期不同施肥模式下稻田土壤磷吸附与解吸的动态研究[J]. 草业学报,2014,23(1):113-122.
- [9] 张海涛,刘建玲,廖文华,等. 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷吸附-解吸的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(2):284-290.
- [10] 赵庆雷,王凯荣,谢小立. 长期有机物循环对红壤稻田土壤磷吸附和解吸特性的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(1):355-362.

路鹏鹏,陈 锐,孙晓宇,等. 枝顶孢霉制剂防治根结线虫过程中土壤酶活性和微生物数量的变化[J]. 江苏农业科学,2017,45(6):277-280.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.06.071

枝顶孢霉制剂防治根结线虫过程中土壤酶活性和微生物数量的变化

路鹏鹏,陈 锐,孙晓宇,赵玲侠,瞿 佳,沈卫荣

(陕西省微生物研究所,陕西西安 710043)

摘要:为了了解枝顶孢霉制剂在设施黄瓜根结线虫防治过程中对土壤微生态环境的影响,通过田间试验研究了黄瓜不同生长期土壤酶活性和微生物数量变化。结果发现,枝顶孢霉制剂对土壤酶活性和微生物数量的影响在幼苗期较显著,盛果期和拉秧期影响较小;幼苗期,土壤脲酶活性降低,蔗糖酶活性升高,过氧化氢酶和磷酸酶变化不显著;土壤中细菌数量减少,放线菌数量变化不显著,真菌数量增加;盛果期仅蔗糖酶活性提高,拉秧期土壤酶活性和微生物数量变化均不显著;土壤微生物数量和土壤酶活性具有一定相关性,且随黄瓜生长期发生变化。结果表明,枝顶孢霉制剂对土壤微生态环境的影响主要在幼苗期,此影响有利于黄瓜幼苗生长和根结线虫的防治。

关键词:枝顶孢霉;过氧化氢酶;脲酶;蔗糖酶;磷酸酶;微生物数量

中图分类号: S154.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)06-0277-04

随着土壤环境条件的恶化和人们食品安全意识的增强,农药监管日趋严格,市场管理日益规范,新开发的农药必须符合低毒、无公害的发展趋势,微生物农药因符合这样的条件而迅速成为研究热点^[1]。土壤酶和土壤微生物是土壤重要的组成部分,其活性和数量变化是土壤质量变化的重要指标。土壤酶参与土壤的物质和能力循环,与土壤有机质含量、土壤

养分相关,其活性是土壤肥力的重要指标之一,甚至有人根据土壤酶活性将土壤分级,以此来评价农业土壤的生产力水平^[2]。土壤微生物是土壤酶的重要来源,其群落多样性不仅与土壤酶变化相关,而且对农业可持续发展有重要意义,有文章称应用外源微生物提高土壤养分利用率和防治植物病虫害的发生是未来农业发展的方向^[3-4]。本研究就设施黄瓜在根结线虫病害胁迫的土壤环境下,通过施用微生物农药枝顶孢霉制剂,研究了土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶、磷酸酶和微生物数量在黄瓜不同生长期的变化及它们相互之间的相关性。了解土壤酶活性和微生物数量的变化,可以掌握微生物农药在防治根结线虫的同时对土壤微生态环境的影响,可以为微生物农药合理安全使用提供参考,能更好地指导微生物农药的施用量、施用时期和施用次数,达到防治害虫和保护环境的双重效果。

收稿日期:2016-08-31

基金项目:陕西省科学院重大专项(编号:2012K-03);陕西省科学院青年人才培养专项(编号:2014K-30);陕西省农业科技创新项目(编号:2012NKC02-14);陕西省西安市科技局农业技术研发项目[编号:NC1404(1)]。

作者简介:路鹏鹏(1983—),男,陕西洛川人,助理研究员,研究方向为微生物菌种资源开发与微生物农药。E-mail: luppeng@163.com。

通信作者:沈卫荣,研究员,研究方向为微生物资源与发酵工程。

E-mail: shenweirong@21cn.com。

[11] Dinkelaker B, Romheld V, Marschner H. Citric acid excretion and precipitation of calcium citrate in the rhizosphere of white lupin (*Lupinus albus* L.) [J]. Plant Cell & Environment, 2006, 12(3): 285-292.

[12] Gabelman W H, Gerloff G C. The search for and interpretation of genetic controls that enhance plant growth under deficiency levels of a macronutrient [J]. Plant and Soil, 1983, 72(2): 335-350.

[13] 严加亮. 武夷山不同海拔土壤磷素的空间异质性研究[D]. 福州:福建农林大学,2012:6-7.

[14] 黄永涛,吕瑜良,丁 易,等. 海南岛霸王岭4种热带森林类型林地土壤养分状况的比较分析[J]. 西部林业科学,2013(1): 64-69.

[15] 赵如金,李 潜,吴春笃,等. 北固山湿地土壤氮磷的空间分布特征[J]. 生态环境学报,2008,17(1):273-277.

[16] 陈思宇,于 惠,冯琦胜,等. 甘南高原土壤氮磷比空间异质性

研究[J]. 草地学报,2013,21(1):30-36.

[17] 刘雯霞,朱柯嘉. 青藏高原东缘高寒草甸不同功能群植物氮磷化学计量特征研究[J]. 中国草地学报,2013,35(2):52-58.

[18] 张晓琳,王 帅,王 旭,等. 海南吊罗山自然保护区土壤有机碳贮量研究[J]. 热带作物学报,2014,35(2):362-368.

[19] 干友民,李志丹,泽 柏,等. 川西北亚高山草地不同退化梯度草地土壤养分变化[J]. 草业学报,2005,14(2):38-42.

[20] 王 帅,李佳灵,王 旭,等. 海南吊罗山自然保护区土壤氮研究[J]. 热带作物学报,2015,36(1):192-198.

[21] 谢寄托. 莽山常绿阔叶林土壤养分分布规律研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2014.

[22] 朱建奎. 山西太岳山地区森林土壤理化性状研究[D]. 北京:北京林业大学,2009.

[23] 苏立新,肖 健,王淑琴,等. 北京市海淀区农田耕层土壤养分现状与变化趋势[J]. 中国土壤与肥料,2004(5):17-20.