

蚯蚓活动对红壤磷素有效性的影响及其活化机理研究

刘德辉¹, 胡 锋¹, 胡 佩²

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 四川师范大学化学与生命科学学院, 成都 610066)

摘要:通过盆钵生物试验研究了秉氏环毛蚓(*Pheretima pingi*) 在红壤基质中对稻草、花生桔、油菜桔 3 种有机物料分解速率的影响, 研究了蚯蚓活动对红壤全磷含量和有效磷含量、对土壤碳水化合物含量、土壤磷酸酶活性的影响。并着重探讨了人工接种蚯蚓提高红壤有效磷的效果及其活化机理。研究结果揭示: ①蚯蚓活动促进了有机物料的分解, 加速了磷素的生物归还作用; ②方差分析表明, 在培养期间所有处理的土壤有效磷含量均得到显著或极显著提高; 其中有机物料接种蚯蚓的 3 种处理分别与其不接种蚯蚓的处理的土壤有效磷含量之间差异均达显著水平; ③蚯蚓活动有改善红壤酸度状况的趋势, 同试验前比较(原土的土壤 pH(H₂O)=4.34), 在培养试验后期, 3 种物料接种蚯蚓的土壤 pH(H₂O)值分别提高了 0.17 单位(稻草接种蚯蚓处理)、0.35 单位(油菜桔接种蚯蚓处理)和 0.44 单位(花生桔接种蚯蚓处理); 方差分析显示, 花生桔组两处理间和油菜桔组两处理间的土壤 pH 值的差异达到显著水平。在 150d 的培养期内, 3 种有机物料接种蚯蚓的处理与其不接种蚯蚓的处理比较时, 土壤 pH 值的差异亦达到显著水平; ④蚯蚓活动增加了土壤碳水化合物含量。方差分析结果显示: 3 种有机物料接种蚯蚓的处理与不接种蚯蚓处理的土壤碳水化合物含量之间的差异均达到显著水平; ⑤蚯蚓活动增强了土壤微生物活性和土壤磷酸酶活性。蚯蚓的吞食、排粪等生理过程改变了土壤微生物种群类型及其数量; 蚯蚓活动提高了土壤磷酸酶活性, 增加了土壤中有机磷含量, 从而提高了土壤有效磷含量。蚯蚓活动及其特殊的生理过程所产生的综合作用使土壤有效磷含量和磷素有效性明显提高。

关键词:蚯蚓活动; 红壤; 磷素有效性; 活化机理

Influence of earthworm activities on phosphorus availability of red soil and activated mechanism induced by earthworm

LIU De-Hui¹, HU Feng¹, HU Pei² (1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. College of Chemical and Life Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2299~2306.

Abstract: The influence of inoculating earthworm (*Pheretima Pingi*) on phosphorus availability in red soil was studied by conducting pot experiments. Various aspects including decomposition of organic materials (rice straw, peanut residue and rape residue), soil total phosphorus and available phosphorus, soil carbohydrate content and soil phosphatase activity were taken into account. In this paper, the effect and mechanism of increasing phosphorus availability in red soil due to the inoculation of earthworm were mainly

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999011801); 国家自然科学基金资助项目(49871046)

收稿日期:2002-12-29; **修订日期:**2003-04-12

作者简介:刘德辉(1946~), 男, 福建武平县人, 教授。主要从事土壤生态、土壤肥力研究。E-mail: liudehui@sohu.com

Foundation item: Chinese National Key Project for Basic Scientific Research (No. G1999011801) and National Natural Science Foundation of China (No. 49871046)

Received date: 2002-12-29; **Accepted date:** 2003-04-12

Biography: LIU De-Hui, Professor, main research field: soil ecology and soil fertility. E-mail: liudehui@sohu.com

explored. The main results were summarized as follows:

(1) Earthworm activities accelerated the decomposition of organic materials and the biological returning of phosphorus in the soil ecosystems, which made phosphorus in the organic materials a direct part of soil available phosphate. Significance on the decomposition of organic materials is in the descending order of peanut residue > rice straw > rape residue. (2) Variance analysis showed that the available phosphate for all the treatments increased significantly during a 150-day incubation. Differences of the soil available phosphate contents between the treatments with organic materials plus earthworms and the treatments with organic materials but earthworm free were significant. (3) There was a tendency of improving red soil acidity by earthworm. As compared to the soil pH value ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) = 4.34$) at the beginning of incubation, the pH values increased 0.17 for the treatment with rice straw plus earthworm, 0.35 for the treatment with rape residue plus earthworm and 0.44 for the treatment with peanut residue plus earthworm, respectively. (4) Earthworm activities increased the content of soil carbohydrate. Statistical analysis indicated that the carbohydrate contents in the soil with organic material and earthworm increased significantly. (5) Inoculation of earthworm enhanced soil microbial activities and soil phosphatase activity. The physiological processes of earthworm's swallowing and excreting changed the population types and the quantities of soil microbe. Improvement of the soil phosphatase activity by inoculating earthworm increased the soil organic phosphorus and thus the soil available phosphorus content was raised. The integrative aspects of earthworm activities and its special physiological process enhanced the content of available phosphorus and the phosphate availability of red soil.

Key words: earthworm activities; red soil; phosphorus availability; activated mechanism

文章编号: 1000-0933(2003)11-2299-08 中图分类号: S154 文献标识码: A

红壤是我国热带、亚热带的重要土壤资源。由于长期对土壤资源的不合理利用,导致土壤肥力下降和生产力减退。土壤养分退化,尤其是土壤磷素有效性低是红壤退化中的一个主要问题,已成为红壤生产力下降的主要限制因子之一^[1]。红壤区域旱作耕地全磷含量并不算低^[2],尤其耕层土壤累积态磷日趋增加,如何利用这部分潜在磷素资源,使其适当活化,对于我国农业持续发展具有重要的意义。土壤中缓效磷肥肥效的发挥取决于土壤生物的活化作用^[3]。蚯蚓是土壤中一类主要的、在土壤熟化和有机质转化中起重要作用的动物,它具有很强的吞食与转化有机物料的能力,是一种宝贵的土壤生物资源。有研究表明,蚯蚓活动能提高土壤肥力,使土壤中有效养分增加,有利于作物根系生长发育和对养分的吸收^[4~6]。但有关蚯蚓活动对红壤磷素有效性影响及其机理的研究却很鲜见^[7]。退化红壤中磷素有效性降低、磷的固定等问题一直困扰着人们,至今还未找到好的解决方法。本文通过人工接种蚯蚓,对红壤磷素有效性及其活化机理进行室内研究,为合理利用红壤区域的土壤生物资源和退化红壤生态系统的功能恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

红壤采自中国科学院鹰潭红壤生态试验站旱地,母质为第四纪红粘土。采样深度 0~20cm,供试土壤的 $\text{pH}(\text{水浸}) 4.34$,土壤有机碳 11.7g/kg,全氮 0.92g/kg,全磷 0.52g/kg,有效磷 16.5mg/kg。

供试蚯蚓为秉氏环毛蚓(*Pheretima Pingi*)。供试有机物料为稻草、花生秸、油菜秸。有机物料和蚯蚓也采自中国科学院鹰潭红壤生态试验站。

1.2 材料的准备

土壤处理、装盆:采回的土壤经风干、粉碎、过 1cm 粗筛,捡去杂物,混匀装盆。每盆装入风干土壤 1kg。盆钵底部出水孔上盖一层尼龙窗纱以防蚯蚓逃逸。

蚯蚓的选择 将采回的蚯蚓洗净,放入大的塑料桶内暂养。接种蚯蚓前,将蚯蚓洗净,放置过夜,让其排尽体内内容物后,挑选活性较好、两条总重量相同的蚯蚓配为一组,放入供试盆钵的土壤中。

有机物料处理 将稻草和花生桔剪成 1cm 左右长,油菜桔用粉碎机打成 2cm 左右碎片,分别加水浸泡 1 周左右,并不断翻动。滤去多余的水后,加入一定量的尿素调节有机物料的 C/N 比率,再堆制 1 周,晾干后置于 65℃烘箱中干燥 12h 待用。

1.3 培养试验设置

将装好的盆钵,浇水调节土壤含水量为 25%,放置 2d,让土壤中的微生物得以活化。每盆接种 2 条蚯蚓(对照不接种蚯蚓),覆盖已处理过的 3 种有机物料,用量为稻草组 15g、花生桔组 20g、油菜桔组 20g。每个处理重复 3 次。盆口用尼龙窗纱捆扎好,以防蚯蚓从上面逃逸,放置 25℃的温室内培养。试验过程中常补水分以保持适当的土壤湿度。分别在培养 25、50、100、150d 时采样。采样时将盆钵内容物倾出,仔细捡出土壤中的蚯蚓和残余的有机物料,分别称重。余下的土壤风干、混匀、磨碎、过筛,供分析测定之用。

1.4 分析方法

土壤全磷用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消化、钼锑抗比色法测定^[8];土壤有效磷用 0.05 mol/L HCl -0.0125 mol/L H_2SO_4 提取法(双酸法)测定^[9],土壤碳水化合物用 Dubois 法(酚-硫酸法)测定^[10];土壤微生物磷(Biomass-P)用 CHCl_3 熏蒸后,用 0.5 mol/L NaHCO_3 (pH8.5)提取^[11];磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法测定^[12];有机物料中全磷用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮、钒钼黄比色法测定^[9]。

2 结果与讨论

2.1 蚯蚓活动对有机物料分解速率的影响

蚯蚓吞食和转化有机物料的能力很强(表 1)。在培养第 50 天时,花生桔+蚯蚓、稻草+蚯蚓和油菜桔+蚯蚓的分解量分别达到 58.0%、32.7%和 25.5%,分别比各自的对照处理增加 80.7%、13.7%和 36.4%。可见蚯蚓在有机物料分解中起到不同程度的促进作用。统计结果表明,花生桔组二处理之间的有机物料分解率的差异达极显著水平,而油菜桔组二处理之间的有机物料分解率的差异达显著水平。稻草组二处理之间的有机物料分解率的差异在本试验条件下未达显著水平,不过两者的分解量与分解率仍存在较大差异。另外,3 种有机物料覆盖于土壤表面经 50d 自然分解的分解速率之间也存在极显著差异,分解速率的次序是花生桔>稻草>油菜桔,这主要与各有机物料的 C/N 比率及化学组成成分有关^[13],蚯蚓能够促进有机物料的分解,与蚯蚓直接吞食有机物料和有机物料对蚯蚓的适口性有关,也与蚯蚓对有机物料的机械破碎作用有关,本试验结果与 Mitchell 的结果颇为一致^[14]。

表 1 蚯蚓活动对有机物料分解速率的影响(培养 50d)

Table 1 Effect of earthworm activity on decomposition rate of organic materials (after 50 days incubation)

处理 Treatments	加入有机物料量(g) Weight of organic material	有机物料分解量(g) Weight of decomposition of organic material	有机物料分解率(%) Rate of decomposition of organic material	多重比较 SSR*
花生桔+蚯蚓 Peanut residue + earthworm	20.00	11.60	58.0	a A
花生桔对照 Peanut residue	20.00	6.42	32.1	b B
稻草+蚯蚓 Rice straw + earthworm	15.00	4.91	32.7	b B
稻草对照 Rice straw	15.00	4.32	28.8	bc B
油菜桔+蚯蚓 Rape residue + earthworm	20.00	5.10	25.5	c BC
油菜桔对照 Rape residue	20.00	3.74	18.7	d C

* 不同的小写和大写字母分别表示 5%和 1%水平的显著性差异 Different small letters and capital letters mean significant at $P=5\%$ and $P=1\%$ level, respectively

2.2 蚯蚓活动对红壤全磷含量的影响

各处理培养 25、50、100、150d 的土壤全磷含量见表 2。从表 2 数据来看,红壤原土的全磷含量

(519.2mg/kg)不低,培养一段时间后,由于有机物料的分解,导致土壤全磷含量有不同程度的增加。但 F 测验结果表明,接种蚯蚓的 3 组处理和相应对照处理之间土壤全磷的变化均未达到显著水平。

表 2 各处理的土壤全磷含量

Table 2 The contents of total P in the soil of different treatments (P, mg/kg)

处理 Treatments	培养时间 Incubation time (d)					方差分析 Variance analysis
	0	25	50	100	150	
稻草+蚯蚓 Rice straw + earthworm	519.2±18.3	517.7±21.9	532.8±25.6	548.5±17.0	543.5±13.4	$F_a=3.82$ $F_b=1.27$
稻草对照 Rice straw	519.2±18.3	520.11±3.8	521.5±12.5	519.8±10.3	523.6±26.3	
花生秸+蚯蚓 Peanut residue + earthworm	519.2±18.3	529.2±8.7	529.9±11.8	558.1±2.7	546.6±13.9	$F_a=4.08$ $F_b=0.64$
花生秸对照 Peanut residue	519.2±18.3	525.0±11.4	524.1±19.0	519.1±12.7	515.7±7.0	
油菜秸+蚯蚓 Rape residue + earthworm	519.2±18.3	508.5±9.2	525.8±4.8	523.8±5.6	525.4±4.8	$F_a=6.03$ $F_b=2.08$
油菜秸对照 Rape residue	519.2±18.3	508.1±9.3	514.7±15.3	508.9±12.2	514.0±4.8	

* 表内数据均为 $\bar{X}$ (平均值)±Se(标准差); F_a 为处理因素的 F 值, $F_{0.05}=7.71$, $F_{0.01}=21.20$; F_b 为培养时间因素的 F 值, $F_{0.05}=6.39$, $F_{0.01}=15.98$, 以下同(表 3、4、5、7); The data in the table stand for $\bar{X}$ (average) ± Se (standard error); F_a F values between every two treatments ($F_{0.05}=7.71$, $F_{0.01}=21.20$); F_b F values among incubation time ($F_{0.05}=6.39$, $F_{0.01}=15.98$); Table 3, Table 4, Table 5 and Table 7 were same as Table 2

2.3 蚯蚓活动对红壤有效磷的影响

土壤有效磷是评价土壤供磷能力的重要指标,它与作物产量有较好的正相关关系。土壤有效磷并不是指土壤中某一特定形态的磷,但它可以相对地说明土壤的供磷水平。应用不同的方法测定同一土壤,可以得到不同的有效磷数量,因此土壤有效磷水平只是一个相对指标,在所有的处理中,经过一段时间的培养,尽管土壤全磷含量变化不明显,但土壤有效磷含量均有较大幅度的提高(见表 3)。其中以花生秸+蚯蚓处理最高,该处理在培养 25、50、100、150d 时的有效磷含量分别比培养之初增加 28.5%、48.5%、63.0%和 75.2%。在培养到 100~150d 时花生秸+蚯蚓处理的土壤有效磷含量已达到 26.9mg/kg 和 28.9mg/kg。这与蚯蚓活动、有机物料的分解速度以及花生秸中含有较高磷量(198mg/kg,高于稻草的 140mg/kg 和油菜秸的 68mg/kg)有关。

表 3 各处理的土壤有效磷含量

Table 3 The contents of available P in the soil of the different treatments (P, mg/kg)

处理 Treatments	培养时间 Incubation time (d)					方差分析 Variance analysis
	0	25	50	100	150	
稻草+蚯蚓 Rice straw + earthworm	16.5±2.3	19.7±1.1	22.8±2.1	23.8±1.4	25.8±2.0	$F_a=8.99^*$ $F_b=276.16^{**}$
稻草对照 Rice straw	16.5±2.3	18.5±3.3	22.3±1.3	23.3±1.5	25.1±2.3	
花生秸+蚯蚓 Peanut residue + earthworm	16.5±2.3	21.2±1.9	24.5±1.5	26.9±1.4	28.9±2.0	$F_a=10.41^*$ $F_b=39.82^{**}$
花生秸对照 Peanut residue	16.5±2.3	19.6±3.1	22.7±3.1	24.2±1.9	25.3±0.8	
油菜秸+蚯蚓 Rape residue + earthworm	16.5±2.3	18.9±2.9	22.5±1.3	22.7±1.0	24.0±3.4	$F_a=12.24^*$ $F_b=11.71^*$
油菜秸对照 Rape residue	16.5±2.3	16.1±0.3	18.2±0.8	20.1±2.0	21.6±0.2	

对表 3 数据进行 F 测验的结果表明:在培养期间所有处理的土壤有效磷含量均得到显著或极显著提高;其中有机物料接种蚯蚓的 3 种处理分别与其不接种蚯蚓的处理的土壤有效磷含量之间差异均达显著

水平。

2.4 蚯蚓活动提高红壤磷素有效性的机理

2.4.1 蚯蚓活动改变了土壤的 pH 值,使土壤磷素有效性提高 试验结果表明:蚯蚓活动有改善红壤酸度状况的趋势(表 4)。各处理土壤与原土相比,pH 值(水浸)均有不同程度的提高,有机物料接种蚯蚓处理的 pH 值上升的幅度高于单施有机物料的处理。同试验前比较(原土的土壤 pH(H₂O)=4.34),在培养试验后期,3 种物料接种蚯蚓的土壤 pH(H₂O)值分别提高了 0.44 单位(花生秸接种蚯蚓处理)、0.35 单位(油菜秸接种蚯蚓处理)和 0.17 单位(稻草接种蚯蚓处理)。F 测验结果显示,花生秸组两处理间和油菜秸组两处理间的土壤 pH 值的差异达到显著水平,稻草组两处理间的差异未达显著水平。在 150d 的培养期内,3 种有机物料接种蚯蚓的处理与其不接种蚯蚓的处理比较时,土壤 pH 值的差异均达到显著水平。据胡锋等人^[15]的研究,蚯蚓活动对红壤微域(如蚓粪)pH 值提高更为明显,可达到 1.2 个单位(水浸)。

表 4 各处理的土壤 pH 值(水浸)

Table 4 The pH(H₂O) in the soil of the different treatments

处理 Treatments	培养时间 Incubation time (d)					方差分析 Variance analysis
	0	25	50	100	150	
稻草+蚯蚓 Rice straw + earthworm	4.34	4.50	4.46	4.49	4.45	$Fa=2.87$
稻草对照 Rice straw	4.34	4.62	4.51	4.49	4.47	$Fb=10.19^*$
花生秸+蚯蚓 Peanut residue + earthworm	4.34	4.61	4.46	4.46	4.54	$Fa=7.88^*$
花生秸对照 Peanut residue	4.34	4.66	4.69	4.61	4.78	$Fb=7.64^*$
油菜秸+蚯蚓 Rape residue + earthworm	4.34	4.54	4.49	4.44	4.51	$Fa=9.76^*$
油菜秸对照 Rape residue	4.34	4.64	4.69	4.61	4.59	$Fb=6.95^*$

土壤 pH 值上升的原因:①蚯蚓吞食有机物料的能力很强,可将有机物质结合入土壤内,有机物质的某些活性基团导致土壤 pH 值改变。②有机物料分解过程中产生的有机还原物质使土壤中的铁、锰氧化物等被还原,消耗了土壤溶液中的质子使土壤 pH 值增高^[16]。

pH 上升对土壤磷的有效性影响,D. Lopez-Hernandez^[7]的假设可以作出解释:①pH 的增加,减少了土壤与磷的吸附位置(吸附位点),降低了土壤对磷的吸附,增加了磷的溶解性。pH 的增加促进了土壤中高分子化合物解聚,从而增加了磷的有效性。②pH 的微小改变,都会影响微生物的活性和代谢,刺激原来环境中的微生物分泌有机酸,去竞争土壤中磷的吸附位点,使被土壤吸附的磷释放出来。pH 的变化,可以使潜在形态的养分得到适当活化。

2.4.2 蚯蚓活动增加了土壤碳水化合物的含量,增强了土壤的解磷作用 蚯蚓分泌的粘液主要是粘多糖,它在促进土壤形成良好团聚结构的同时,也为微生物的活动提供有效的碳源和氮源。所以,研究土壤磷素形态及其有效性时,考虑土壤碳水化合物的状况是必要的。土壤碳水化合物的含量(以葡萄糖计)见表 5。F 测验结果表明:在培养期间各处理的碳水化合物的含量均得到极显著提高;另外,花生秸组两处理之间和稻草组两处理之间碳水化合物的量存在显著差异;油菜秸组两处理之间碳水化合物的量未达到显著差异。这与有机物料的性质有关。

蚯蚓分泌的粘液,主要成分就是多种碳水化合物的混合物,它对被红壤固定的磷具有较强的解磷作用。D. Lopez-Hernandez 提出的假设^[7],可能提供了一种更好的解释:由于存在大量的蚯蚓粘液,这些粘液富含丰富的碳水化合物和羧基团,能阻碍并专一性地竞争

土壤与正磷酸的吸附位点,增大了磷的溶解形式,从而引起磷素有效性的改变。韩兴国^[17]等人还研究了葡萄糖和有机质(栎树类凋落物和三叶草茎叶)对高度风化老成土中磷素形态的影响。无论是否加入了无机磷,葡萄糖改变了土壤中磷素的形态。在另一种性质相似的酸性土壤中施入粉碎的栎树(*Quercus* sp.)凋落物和三叶草(*Trifolium pratense*)后,野生商陆(*Phytolacca americana*)吸收磷素的能力增强,通过进一步对土壤中的磷素进行化学分级,结果表明,这些有机物质可以改变土壤中磷素存在的形态。在高度风化的红壤上,碳水化合物(包括有机质分解的中间产物、土壤动物和微生物的代谢产物等有机成分)的大量

存在,可以逐渐改变红壤的化学性质,从而提高土壤磷素有效性。

表 5 土壤碳水化合物含量

Table 5 The concentration of soil carbohydrates (mg/g)

处理 Treatments	培养时间 Incubation time (d)					方差分析 Variance analysis
	0	25	50	100	150	
稻草 + 蚯蚓 Rice straw + earthworm	1.40±0.05	1.51±0.02	2.50±0.04	2.54±0.02	2.46±0.04	$F_a=9.05^*$ $F_b=85.98^{**}$
稻草对照 Rice straw	1.40±0.05	1.43±0.14	2.30±0.01	2.35±0.06	2.17±0.05	
花生秸 + 蚯蚓 Peanut residue + earthworm	1.40±0.05	1.75±0.14	2.49±0.12	2.49±0.12	2.48±0.01	$F_a=11.26^*$ $F_b=46.46^{**}$
花生秸对照 Peanut residue	1.40±0.05	1.57±0.09	2.21±0.10	2.30±0.05	2.12±0.08	
油菜秸 + 蚯蚓 Rape residue + earthworm	1.40±0.05	1.88±0.21	2.56±0.08	2.54±0.01	2.31±0.08	$F_a=5.34$ $F_b=28.60^{**}$
油菜秸对照 Rape residue	1.40±0.05	1.42±0.04	2.31±0.05	2.36±0.05	2.26±0.12	

对土壤碳水化合物含量和土壤有效磷含量的数据进行相关分析,结果见表 6;除了油菜秸对照处理外,其它处理都证明了土壤碳水化合物与有效磷之间存在显著的正相关关系。

2.4.3 蚯蚓活动增强了微生物的活性,使土壤磷素有效性提高 土壤微生物和土壤动物都是生态系统中物质的分解者,它们的协同作用在物质循环中有着重要意义。微生物细胞磷的测定结果表明,在有机物料和蚯蚓的共同作用下,土壤中微生物细胞磷含量有较大增加,且接种蚯蚓的处理比相应的对照处理的微生物细胞磷含量均高。培养 100d 时,接种蚯蚓的处理比相应的对照处理的微生物细胞磷分别增加 88.9%(稻草)、62.5%(油菜秸)、41.7%(花生秸)。说明蚯蚓活动增加了微生物的数量。微生物通过对磷素的合成和矿化作用,改变磷的固定和释放,控制土壤中磷的浓度,影响磷的有效性。

试验过程中还发现:①所有油菜秸+蚯蚓处理,都长出真菌子实体。②几乎所有的蚓粪,在排出体外一周左右,即长出白色菌落,经判断为放线菌的菌落。说明土壤经过蚯蚓的消化道后,土壤微生物的种群及其数量也发生了变化。张立宏等人^[18]的研究也证实蚯蚓吞食土壤过程中改变了土壤微生物的种群组成及其数量。

2.4.4 蚯蚓活动增强了土壤磷酸酶的活性,从而使土壤磷素有效性提高 土壤中难溶性的有机磷有效性不高,必须要在磷酸酶作用下矿化,成为无机态或水溶性的有机磷,才能被作物吸收利用。磷酸酶活性的强弱,是衡量土壤肥力的重要指标之一,也是一个标示土壤管理系统效果和土壤有机质含量的重要指标^[19]。蚯蚓活动提高了土壤磷酸酶的活性(见表 7),也间接提高了土壤磷素有效性。

F 测验结果表明,接种蚯蚓的处理与相应的对照之间,磷酸酶活性的差异都达到了显著水平。从培养初期(25~50d)到培养后期(100~150d)的测定数量看,任何时候的土壤磷酸酶活性,接种蚯蚓的处理均高于对照。这说明土壤磷酸酶活性的增加与蚯蚓活动密切相关。

2.4.5 蚯蚓活动促进有机物料分解,加速了磷素归还作用 有机物料中的磷,是生物有效性很高的磷。依据供试有机物料的磷素含量(稻草为 140 mg/kg,

表 6 土壤碳水化合物与有效磷的关系

Table 6 Relationship between soil carbohydrate and available phosphorus

处理 Treatments	回归方程 Regression equation	相关系数 Related coefficients
稻草 + 蚯蚓 Rice straw + earthworm	$Y=0.1433X-1.0304$	0.912 [*]
稻草对照 Rice straw	$Y=0.1209X-0.6249$	0.902 [*]
花生秸 + 蚯蚓 Peanut residue + earthworm	$Y=0.0986X-0.205$	0.939 [*]
花生秸对照 Peanut residue	$Y=0.1045X-0.344$	0.924 [*]
油菜秸 + 蚯蚓 Rape stem + earthworm	$Y=0.1469X-0.9352$	0.924 [*]
油菜秸对照 Rape residue	$Y=0.1762X-1.3106$	0.834

* $P<0.05$

花生秸为 198mg/kg,油菜秸为 68mg/kg)和培养 50d 时各有机物料的分解量(见表 1),可以计算出不同处理下,3 种有机物料的磷素归还量(表 8)。

表 7 土壤磷酸酶活性(mg 酚/g, 12h)

Table 7 Soil phosphatase activity (mg phenol/g, 12h)

处理 Treatments	培养时间 Incubation time (d)					差分析 Variance analysis
	0	25	50	100	150	
稻草+蚯蚓 Rice straw + earthworm	0.610±0.014	0.666±0.036	0.678±0.048	0.738±0.013	0.698±0.028	$Fa=10.85^*$ $Fb=5.42$
稻草对照 Rice straw	0.610±0.014	0.627±0.013	0.617±0.021	0.660±0.014	0.660±0.039	
花生秸+蚯蚓 Peanut residue + earthworm	0.610±0.014	0.720±0.040	0.756±0.068	0.764±0.047	0.730±0.060	$Fa=7.82^*$ $Fb=3.32$
花生秸对照 Peanut residue	0.610±0.014	0.597±0.051	0.636±0.031	0.707±0.042	0.700±0.041	
油菜秸+蚯蚓 Rape residue + earthworm	0.610±0.014	0.791±0.014	0.766±0.062	0.760±0.045	0.718±0.048	$Fa=7.92^*$ $Fb=1.63$
油菜秸对照 Rape residue	0.610±0.014	0.618±0.038	0.634±0.045	0.682±0.022	0.671±0.024	

表 8 培养 50d 时有机物料的磷素归还量(P, mg)

Table 8 The P returning quantities of organic material after 50 days' incubation

花生秸+蚯蚓 Peanut residue + earthworm	花生秸对照 Peanut residue	稻草+蚯蚓 Rice straw + earthworm	稻草对照 Rice straw	油菜秸+蚯蚓 Rape residue + earthworm	油菜秸对照 Rape residue
23.0	12.7	6.9	6.0	3.5	2.5

可见,蚯蚓活动促进有机物料分解的同时,也加速了土壤-生物系统的磷素归还作用。使有机物料中的磷素转化成土壤有效磷的一部分,从而提高了土壤磷素有效性。

土壤有效磷是一个复杂的问题,它并不是指土壤中某一特定形态的磷,而是一系列化合物的组合。本研究表明,在有机物料和蚯蚓的共同作用下,土壤中有效磷含量增加,说明蚯蚓活动对磷素具有较强的活化作用。把蚯蚓引入土壤的同时施用有机物料,是充分发挥蚯蚓培肥土壤、改善养分有效性的两项紧密关联的措施。

References:

- [1] He D Y. *Soil Fertility and Fertilization of Cultivation plant in the South of China*. Beijing: Science Press, 1994. 76~78.
- [2] Administration Bureau of Land of Jiangxi Province. *Soils in Jiangxi Province*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1991. 411~412.
- [3] Zhang B G, et al. Roles of soil organisms on the enhancement of plant availability of soil phosphorus. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, **35**(1): 104~111.
- [4] Yang Z J, et al. *Breeding Technique and Development of Earthworm*. Beijing: China Agriculture Press, 1999. 45~48.
- [5] Edwards C A, et al. The influence of arthropods and earthworms upon the root growth of cereals after five seasons of direct drilling. *J. Appl. Ecol.*, 1978, **15**: 789~795.
- [6] Edwards C A, et al. Effect of earthworm inoculation upon the root growth of direct drilled cereals. *J. Appl. Ecol.*, 1980, **17**: 533~543.
- [7] Lopez-Hernandez D, et al. Phosphorus transformations in two P-sorption contrasting tropical soils during transit through *pontoscolex corethrurus*. *Soil Biol. Biochem.*, 1993, **25**(6): 789~792.

- [8] Lu R K, *et al.* *Analysis Method of Soil Agricultural Chemistry*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. 166~172.
- [9] Nanjing Agriculture University. *Soil Agricultural Chemistry Analysis(the 2nd edition)*. Beijing: Agriculture Press, 1986. 76~77.
- [10] Wang J R, Gong Y H. The extract and measure of soil carbohydrate. *Chinese Journal of Soil Science*, 1999, **30** (5):239~241.
- [11] P. C. Brookes, *et al.* Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 1982, **16**(2):169~175.
- [12] Guan S Y. *Soil Enzyme and the Method of Research*. Beijing: Agriculture Press, 1986. 18~19.
- [13] Ding R X, Liu D H. Decomposition and transformation of organic materials in bleaching paddy soil. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1988, **11**(2):88~91.
- [14] Mitchell M J. Role of earthworm *Eisenia foetida* in affecting organic matter decomposition in microcosms of sludge-amended soil. *J. of Appl. Ecology*, 1982, **19**(3):805~812.
- [15] Hu F, *et al.* Effects of earthworm and ant activity on red soil properties. In: Wang M Z, Zhang T L, He Y Q. eds. *Research on Red Soil Ecosystem (5th volume)*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1998. 276~285.
- [16] Research Group of Soil Degradation Mechanism and Protection Measurement of Red Soil in Southern China. *Degradation Mechanism and Protection Measurement of Red Soil in China*. Beijing: China Agricultural Press, 1999. 22.
- [17] Han X G, *et al.* Effect of citric acid, glucose and organic matter on plant P uptake and soil P fractionations in a highly weathered ultisol. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, **20**(2):97~112.
- [18] Zhang L H, *et al.* Effect of cooperation of microbe and earthworm on soil fertility. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, **10**:117~120.
- [19] Jordan D, *et al.* Evaluation of microbial methods as potential indicators of soil quality in historical agricultural fields. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, **19**:297~302.

参考文献:

- [1] 何电源. 中国南方土壤肥力与栽培植物施肥. 北京:科学出版社, 1994. 76~78.
- [2] 江西土地利用管理局. 江西土壤. 北京:中国农业科技出版社, 1991. 411~412.
- [3] 张宝贵, 等. 土壤生物在土壤磷有效化中的作用. *土壤学报*, 1998, **35**(1):104~111.
- [4] 杨珍基, 等. 蚯蚓养殖技术与开发利用. 北京:中国农业出版社, 1999. 45~48.
- [8] 鲁如坤, 等. 土壤农业化学分析方法. 北京:中国农业科技出版社, 2000. 166~172.
- [9] 南京农业大学. 土壤农化分析(第二版). 北京:农业出版社, 1986. 76~77.
- [10] 王俊儒, 龚月桦. 土壤碳水化合物化合物的提取与检测. *土壤通报*, 1999, **30**(5):239~241.
- [12] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京:农业出版社, 1986. 18~19.
- [13] 丁瑞兴, 刘德辉. 有机物料在白土中的分解与转化. *南京农业大学学报*, 1988, **11**(2):88~91.
- [15] 胡锋, 等. 蚯蚓和蚂蚁活动对红壤性质的影响. 见:王明珠, 张桃林, 何圆球主编:红壤生态系统研究(第5集), 北京:中国农业科技出版社, 1998. 276~285.
- [16] 南方红壤退化机制与防治措施研究专题组. 中国红壤退化机制与防治. 北京:中国农业出版社, 1999. 22.
- [17] 韩兴国, 等. 柠檬酸、葡萄糖和有机质对植物磷素吸收和土壤磷素形态的影响. *植物生态学报*, 1996, **20**(2):97~112.
- [18] 张立宏, 等. 微生物和蚯蚓的协同作用对土壤肥力影响的研究. *生态学报*, 1996, **10**:117~120.