

土地利用和轮作方式对旱地红壤生化性质的影响^①

李增强^{1,2}, 赵炳梓^{1*}, 张佳宝¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 封丘农田生态系统国家试验站, 南京 210008;

2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 研究不同土地利用和轮作方式对旱地红壤肥力的影响对提高红壤质量具有十分重要的指导意义。本研究以湖南省桃源县的林地、大豆-油菜轮作、玉米-休闲轮作土壤为研究对象, 明确了林地、农地土壤及农地不同轮作方式对土壤化学和生物性质的影响。结果表明, 林地土壤的 pH、有机碳、速效养分、微生物生物量碳及酶活性(纤维素酶、酸性磷酸酶、转化酶、蛋白酶)均显著高于农地土壤; 大豆-油菜轮作土壤的 pH、养分含量、微生物生物量碳含量及其微生物熵在大多数情况下高于玉米-休闲轮作, 但轮作处理对各酶活性的影响并不完全一致。这种不一致性可能与不同酶对由不同利用和轮作方式导致的土壤性质差异的敏感性不同所致。土壤有机碳和 pH 与各生物指标均呈显著正相关关系, 表明提高该地区的土壤有机碳含量对于维持土壤的生化性质具有重要的作用。

关键词: 林地; 大豆-油菜轮作; 玉米-休闲轮作; 土壤养分; 微生物生物量碳; 酶活性

中图分类号: S158.5

红壤面积广大, 占我国国土总面积的 22.7%^[1]。旱地红壤是十分重要的农业土壤, 其管理措施导致生产力相对不高, 肥力较低, 所具有的酸、黏、瘦等特点突出^[2]。研究发现土地利用方式及其轮作系统均可导致土壤质量变化, 如土壤水分、养分、生物多样性及生物地球化学循环等^[3-4]。对于不同土地利用方式对红壤性质的影响已有较多研究, 例如叶伟建等^[5]发现在退化旱地红壤进行造林要比水田和果园更有利于提高土壤肥力。其他研究者也取得了类似的研究结果^[6-8]。红壤地区的不同土地利用方式也对土壤微生物性质产生了显著影响, 其中林地土壤酶活性^[9-10]、微生物生物量^[11-12]等微生物指标高于旱地红壤。尹刚强等^[13]运用土壤质量综合指数对湘中丘陵区研究后发现坡耕地的土壤质量综合指数显著小于林地。在亚热带、温带地区其他研究表明自然状态下的林地、草地向人工开垦地转化的过程中, 土壤肥力和质量出现退化现象^[14-15]。

不同的作物轮作方式也对红壤性质产生了不同的影响。有研究发现相对于玉米-休闲轮作, 玉米-绿肥轮作处理提高了土壤化学肥力, 改善了土壤物理性质^[16]。陈先茂等^[17]发现不同年限轮作模式的土壤

有机质含量、微生物数量和土壤酶活性均高于花生-冬闲连作模式。其他研究也发现不同的轮作模式对红壤性质产生了显著的影响^[18]。但相同管理模式对不同地点土壤性质的影响可能不是完全相同, 因此为了合理利用某一特定红壤地区的土地和水热资源, 了解当地的土地利用方式及其轮作对土壤生化性质的影响行为就显得十分必要。本文以湖南省桃源县的 3 种典型土地利用及其轮作方式为研究对象, 探讨林地和农地以及农地不同轮作方式对土壤生化性质的影响。

1 材料与方法

1.1 样品采集

土壤样品取自中国科学院桃源农业生态试验站内(简称桃源站), 位于湖南省桃源县漳江镇宝洞峪村(111°27'E, 28°55'N), 地处武陵山区向洞庭湖平原过渡的丘岗地带。地貌类型为红壤地区典型的低丘岗地, 土壤母质为第四纪红色黏土。该实验设置 3 个处理, 分别为: 林地: 种植年限在 50 年以上, 其中主要树种为油茶(*Camellia oleifera* Abel)和马尾松(*Pinus massoniana* Lamb); 大豆-油菜轮作: 大豆一般在 6 月上旬种植, 8 月末收获; 油菜于 9 月中旬种

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB100506)、国家自然科学基金面上项目(41271311)和国家科技支撑计划项目(2012BAD05B0203)资助。

* 通讯作者(bzhao@issas.ac.cn)

作者简介: 李增强(1987—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态环境。E-mail: zqli@issas.ac.cn

植, 次年 5 月中下旬收获。收获后秸秆均移除田间;

玉米-休闲轮作: 一年只种一季玉米, 生长期为 6 月到 9 月。玉米收获后秸秆移除田间, 同时清除杂草, 不再种植其他作物。农田前期为荒地, 自然植被为杂草和小型的灌木类, 农地的施肥管理措施按照当地农民的常规施肥管理, 林地的管理措施也按照当地的常规管理措施, 即不施任何化学肥料, 少量的自家粪肥会被当地农民施到林地里。农地施用尿素、钙镁磷肥和加拿大红色钾肥(主要成分为 KCl)作为氮、磷、钾肥。玉米-休闲轮作处理中只在玉米季施用氮磷钾肥, 化肥施用量为 N 150 kg/hm², P 25 kg/hm², K 75 kg/hm²; 大豆-油菜轮作处理的油菜季的氮肥施用量为 N 150 kg/hm², 不施磷、钾肥; 大豆季的化肥施用量为 N 50 kg/hm², P 25 kg/hm², K 75 kg/hm²。

土样采集时间为 2011 年 3 月中旬, 这时大豆-油菜轮作地的油菜进入开花期, 玉米-休闲轮作地处于休闲期。两种轮作地均采集 0~20 cm 的表层土, 林地先除去表层枯枝落叶后再采集 0~20 cm 土壤, 每个处理采 4 个重复土样, 按 S 形取 6 点作为一个重复土样。土样放到有冰袋的保温箱中带回实验室。土样除去动植物残体和石块后分为两部分, 一部分直接过 2 mm 尼龙筛, 放到 4℃ 冰箱中, 在两周之内测定微生物生物量碳和 5 种酶活性(脲酶、纤维素酶、酸性磷酸酶、转化酶、蛋白酶), 一部分放在阴凉处自然风干后测定土壤 pH 和常规养分含量。

1.2 样品分析方法

土壤 pH 按 1:2.5(土:KCl(1 mol/L))测定, 土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化法测定, 土壤全氮采用半微量开氏法测定, 速效氮采用碱解扩散法测定, 全磷采用钼锑抗比色法测定, 速效磷采用 0.03 mol/L NH₄F-0.025 mol/L HCl 浸提-钼锑抗比色法测定, 速效钾采用 1 mol/L 乙酸铵浸提-火焰光度计法测定。以上分析方法均采用土壤常规分析方法^[19]。

土壤微生物生物量碳的测定采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法测定^[20]。测定时, 称取 20 g 的新鲜土样, 在真空干燥器中用氯仿蒸汽熏蒸 24 h, 用反复抽真空方法除去残存氯仿后, 再用 80 ml 0.5 mol/L 的 K₂SO₄ 溶液振荡 30 min, 立即过滤, 滤出的浸提液用 TOC 自动分析仪(Shimadzu TOC-3100)测定。以熏蒸土样与不熏蒸土样提取的有机碳的差值除以转换系数 K_c (0.45) 计算土壤微生物生物量碳。

$$\text{微生物熵}(\%) = \frac{\text{微生物生物量碳}}{\text{总有机碳}} \times 100\%$$

土壤脲酶采用靛酚蓝比色法测定, 以 24 h 内单位干土(kg)产生的 NH₄⁺ 量(mg)为酶活性单位, 纤维

素酶和转化酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法, 以 24 h 内单位干土(kg)产生的葡萄糖量(mg)为酶活性单位, 酸性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法, 以单位时间(h)单位干土(kg)产生的对硝基酚(pNP)量(mg)为酶活性单位, 蛋白酶采用福林酚比色法, 以 24 h 内单位干土(kg)产生的酪氨酸(tyrosine)量(mg)为酶活性单位^[21]。

1.3 数据处理

数据采用单因素方差分析程序进行统计分析, 多重比较采用邓肯新复检验法(Duncan's New Multiple Range Test)进行显著性检验($P < 0.05$); 土壤有机碳及常规养分与土壤微生物间的相关关系采用 Pearson 相关性分析, 整个数据处理过程采用 SPSS16.0 和 Excel 软件完成。

2 结果与讨论

2.1 土壤 pH 和养分含量

当地土壤为强酸性土壤, 所有土壤的 pH 均小于 5, 但不同土地利用和轮作方式对土壤 pH 有显著影响, 其中林地 > 大豆-油菜轮作 > 玉米-休闲轮作(表 1), 该趋势与不同处理间土壤有机碳变化趋势一致(表 1)。关于在红壤地区通过增加土壤有机碳含量改善土壤酸性障碍的报道已经比较多, 比如, 蔡泽江等^[22]在湖南省祁阳县的红壤地区进行的长期实验结果发现, 长期施用有机肥后, 作物产量提高、土壤 pH 可提升一个单位。因为土壤有机碳含有丰富的活性基团, 如羧基(-COOH)、醇羟基和酚羟基(-OH)等活性基团, 当这些基团以阴离子存在时, 可以专性吸附在土壤铁、铝氢氧化物表面, 交换解离出 OH⁻ 中和了部分酸性物质; 相比林地土壤, 农用地的低 pH 可能还与农用地施用化学氮肥有关, 因为当地习惯林地不施化学肥料, 农用地通常使用尿素氮肥, 该氮肥进入土壤后的硝化淋洗作用均可导致土壤酸化^[23]。尽管有研究认为种植豆科作物有可能加剧土壤酸化^[24], 这与本研究条件下的大豆-油菜轮作处理 pH 高于玉米-休闲轮作相矛盾, 这可能是由于经过多年不同轮作处理后有机质累积对土壤 pH 影响超过豆科作物的影响所致。

本实验条件下, 土壤有机碳(SOC)的变化规律为, 林地土壤最高, 玉米-休闲轮作处理最低, 而大豆-油菜轮作介于两者之间, 并且不同处理间差异显著($P < 0.05$)(表 1)。土壤 SOC 为土壤重要肥力指标之一, 林地土壤 SOC 主要来源于林木的枯枝落叶和根系及其分泌物, 而对农用地来说, 由于作物收获后地上部分移除, 因而大豆-油菜轮作以及玉米-休闲轮作处理的 SOC 主要来源于残留根系及其分泌物。林地

表 1 土地利用和轮作方式对土壤 pH 和养分含量的影响
Table 1 Soil pH and nutrient contents under different land management practices and crop rotation systems

土地利用和 轮作方式	pH	总有机碳 (g/kg)	全氮 (g/kg)	速效氮 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
林地	4.46 ± 0.01 a	38.24 ± 0.14 a	2.21 ± 0.01 a	237.7 ± 2.1 a	63.03 ± 0.18 a	88.78 ± 2.6 c
大豆-油菜轮作	4.11 ± 0.01 b	15.79 ± 0.49 b	1.63 ± 0.02 b	154.2 ± 3.0 b	60.15 ± 1.90 a	113.0 ± 20 b
玉米-休闲轮作	3.63 ± 0.01 c	10.42 ± 0.49 c	1.13 ± 0.01 c	108.3 ± 3.4 c	62.04 ± 4.01 a	135.3 ± 8.4 a

注：表中数据为平均值 ± 标准差，同列数据小写字母不同表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著($n=4$)，下表同。

较高的 SOC 含量可能与长期大量的枯枝落叶及植物根系归还回土壤有关，同时农家粪肥也会促进 SOC 含量的提高。另外农地土壤受人为扰动(如翻耕等)较强，在翻耕条件下，SOC 易于分解，SOC 循环过程得到促进，从而使农地土壤 SOC 含量降低^[25]。农用地中大豆-油菜轮作处理的 SOC 含量高于玉米-休闲轮作，可能由于种植二季作物的残留量大于种植一季所致，因为土壤 SOC 含量一般与土壤中有机的投入量成正比^[26]；再者，玉米-休闲处理的休闲时期内无地表覆盖植物且存在一定的坡度(5°左右)，容易造成水土流失^[27-28]，水土流失作用使得土壤粉粒和黏粒含量变少，砂粒含量增加^[29]，土壤的细颗粒物有利于有机碳在土壤中累积^[30]，从而造成玉米-休闲处理 SOC 含量低于大豆-油菜轮作处理。

土壤氮素含量的变化规律与有机碳的变化规律基本一致(表1)，这可能是因为红壤本身固定铵的能力较差，约有 90% 以上的氮素以有机态的形式存在于有机质中。土壤速效氮库的主要来源为无机肥施用、有机氮矿化、大气沉降，而去向包括作物吸收、淋洗、气态损失^[31]。假设大气沉降量在林地和农地相差不大，林地土壤的较高速效氮含量表示来源于枯枝落叶等的有机氮的分解量超过通过淋洗和气态损失的量。另一方面，有机质含量高的土壤的结构通常得以改善，土壤吸持养分的容量增大^[32]。不同轮作处理间速效氮含量差别除了与土壤 SOC 含量差别外，可能还与大豆和油菜都是固氮作物有关。

不同处理间速效磷含量没有显著性差异(表 1)。红壤地区磷肥的当季利用率一般在10%~25%，每年施入的磷肥大约有 75%~90% 被固定在土中^[33]，因而对农地土壤来说，即使每年施用磷肥，除了被作物吸收带出土壤外，残留的磷也主要以固定态存在于土壤中，从而表现出速效磷含量在处理间差别不大。对于 SOC 含量较高的林地土壤来说，土壤速效磷可能主要来源于 SOC 的分解，因为：林地土壤较高的微生物活性(图 1)可能加速有机质分解，有机质可

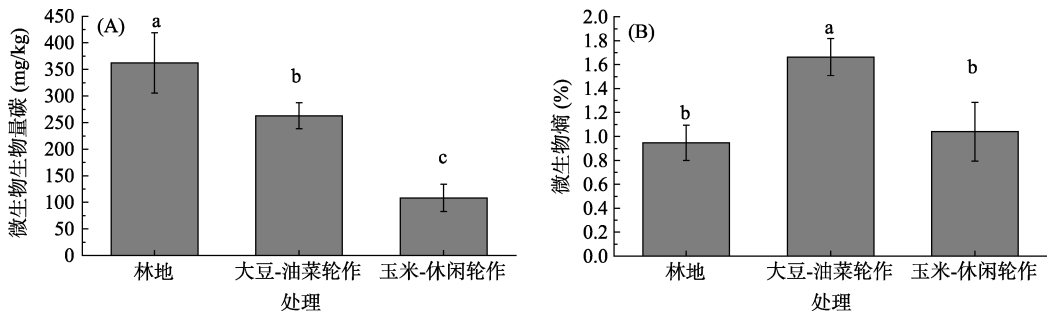
增加磷素的可溶性^[34]但具体有机质分解能产生多少速效磷尚值得我们进一步研究；另一方面，农民可能也会将家中产生的少量有机废弃物(如人畜粪便等)扔到林地里，这可能也是造成林地速效磷含量与农地相当甚至略高的原因(表1)。

与 SOC 和氮素相反，速效钾含量在 3 个处理间的大小顺序为玉米-休闲轮作>大豆-油菜轮作>林地(表 1)。红壤的主要黏土矿物为高岭石，其层间以氢键结合，膨胀性小，固钾能力较弱，因而林地土壤表层较低的速效钾含量可能与其通过有机物逐渐分解的钾的淋溶损失有关^[35]，而农地土壤速效钾主要来自外源钾肥施用，其比较高的速效钾含量可能与施入钾肥没有被作物及时吸收和淋洗有关。

2.2 土壤生物性质

2.2.1 土壤微生物生物量碳及微生物熵 不同处理间微生物生物量碳含量的顺序为林地 > 大豆-油菜轮作 > 玉米-休闲轮作($P<0.05$)(图 1A)，其中林地含量分别为大豆-油菜轮作和玉米-休闲轮作的 1.38 倍和 3.35 倍。土壤微生物生物量碳是土壤有机碳中最活跃和最易变化的部分，是土壤生物肥力的重要标志^[36]，其含量高低可在一定程度上表征土壤微生物的活跃程度。

微生物熵的变化趋势与微生物生物量碳的变化趋势并不一致，其中大豆-油菜轮作处理的微生物熵显著高于林地处理($P<0.05$)，而林地处理和玉米-休闲处理间差异不显著($P>0.05$)(图 1B)。林地较低的微生物熵可能与林地具有较高的有机碳总量有关^[37]；玉米-休闲轮作处理的微生物熵含量与林地土壤类似，但土壤 SOC 含量却是 3 个处理中最低的，表明该处理的易利用碳含量也较低，土壤活性较低；而大豆-油菜轮作处理较高的微生物熵则反映了该处理的活性碳含量比例较高。此外微生物生物量碳含量对外界环境和人为干扰(如施肥)的响应迅速，而土壤总有机碳则变化缓慢，因此选微生物熵作为土壤肥力长期变化的指标需谨慎^[38]，但可作为土壤质量变化的初期指标^[39]。



(图中小写字母不同表示处理间差异达到 $P<0.05$ 显著水平, LSD 检验)

图 1 土地利用和轮作方式对微生物量碳和微生物熵的影响($n = 4$)

Fig. 1 Microbial biomass carbon and microbial quotients under different land management practices and crop rotation systems

2.2.2 土壤酶活性 本研究测定的 5 种酶活性在不同处理间的变化趋势不完全相同,除脲酶外,林地处理的其他 4 种酶活性在 3 个处理间均处于最高水平 ($P<0.05$); 在不同轮作处理间,它们的变化趋势也不尽相同,脲酶活性在 2 个轮作处理间无显著差异,纤维素酶活性为大豆-油菜轮作<玉米-休闲轮作,而其余 3 种酶活性均为大豆-油菜轮作>玉米-休闲轮作(表 2)。对于本研究的 3 个处理来说,由于土地利用和轮作方式不同,土壤的某些理化性质已经产生分离,如表 1 所示,这均有可能导致不同酶活性在不同处理之间的变化产生差异。比如,脲酶主要参与土壤中尿素的转化^[40],林地处理中无外界尿素的施入,脲酶缺少足够的反应底物,从而导致林地脲酶活性处于所有处理的最低水平。Acosta-Martinez 等^[41]认为土壤本身性质不同导致的微生物组成不同也是引起土壤酶活性差异的原因之一。

2.3 土壤生物性质与土壤有机碳及土壤养分之间相关性的分析

土壤 SOC 与土壤生物性质存在显著相关性,除与脲酶为显著负相关外,与 C_{mic} 及其余 4 种酶的活性均呈显著正相关(表 3)。关于土壤 SOC 与土壤酶活性呈显著正相关的报道很多^[42-43]。一般来说,土壤中有有机物料投入量越多,供微生物利用的碳源越多,从而导致土壤微生物生物量和酶活性越高^[44]。因此,我们认为在本研究条件下,除脲酶外,土壤酶活性在不同处理间的差别主要由于不同处理导致的土壤有机质差异所致。但是,土壤 SOC 与脲酶活性的显著负相关与上述结论相矛盾,而刘淑娟等^[45]在广西喀斯特峰丛洼地也有相同的研究结果。一方面,这可能与本研究区较高的全氮、速效氮含量有关;另一方面可能与脲酶本身特性有关,即脲酶在自然界中分布广泛,在动物、植物和微生物体内均能测得脲酶活性,

表 2 土地利用和轮作方式对土壤酶活性的影响

Table 2 Soil enzyme activities under different land management practices and crop rotation systems

土地利用和 轮作方式	脲酶 (NH_4^+ , mg/(kg·d))	纤维素酶 (glucose, mg/(kg·d))	酸性磷酸酶 (pNP, mg/(kg·d))	转化酶 (glucose, mg/(kg·d))	蛋白酶 (tyrosine, mg/(kg·d))
林地	71.8 ± 16.0 b	207.6 ± 8.3 a	223.1 ± 3.3 a	1021.9 ± 6 a	51.7 ± 1.9 a
大豆-油菜轮作	106.9 ± 5.1 a	48.9 ± 35.2 c	68.6 ± 2.8 b	496.3 ± 25.6 b	42.9 ± 0.5 b
玉米-休闲轮作	101.2 ± 12.0 a	65.5 ± 18.1 b	53.2 ± 0.9 c	236.3 ± 13.4 c	17.6 ± 0.3 c

表 3 土壤微生物与土壤养分的相关性

Table 3 Correlation between soil microbial and soil nutrient

项目	微生物生物量碳	脲酶	酸性磷酸酶	纤维素酶	转化酶	蛋白酶
pH	0.885**	-0.608	0.863**	0.960**	0.732*	0.981**
有机碳	0.811**	-0.618*	0.994**	0.914**	0.926**	0.777**
全氮	0.884**	-0.513	0.931**	0.826**	0.932**	0.895**
速效氮	0.860**	-0.489	0.956**	0.889**	0.974**	0.812**
速效磷	0.322	0.273	0.347	0.563	0.652*	0.011
速效钾	-0.623*	0.617*	-0.644*	-0.385	-0.463	-0.805**

注: **表示在 $P<0.01$ 水平上相关; *表示在 $P<0.05$ 水平上相关, $n = 12$ 。

来源较丰富,在土壤中十分稳定^[46]。上述结果同时表示土壤 SOC 含量可以认为是表征旱地红壤肥力的重要指标。

土壤 pH 与土壤微生物生物量存在显著正相关性(表 3),这与 Tian 等^[47]的研究结果相同,随着土壤 pH 的降低土壤微生物生物量碳也降低。这可能是由于低 pH 条件下影响了土壤养分的可利用性和微生物的代谢活性,同时低 pH 条件下增加了铝对微生物的毒害作用^[48]。除脲酶外,土壤 pH 与土壤酶活也呈显著正相关(表 4)。土壤中的酶主要是由土壤微生物分泌的,土壤 pH 通过影响微生物生物量和微生物群落结构多样性^[49],从而影响了土壤酶的活性。脲酶活性与土壤 pH 不相关可能与脲酶的来源广泛有关。

土壤全氮和速效氮与土壤生物性质存在显著相关性,除与脲酶为不显著负相关外,与土壤微生物生物量碳及其余 4 种酶活性均呈显著正相关(表 3)。这可能是由于氮素是微生物生长所必需的元素,充足的氮素供应有利于土壤生物性质的保持。速效磷和速效钾与土壤生物性质之间的相关性没有明显的规律,可能是由于酶对速效磷和速效钾影响作用的过程中,彼此之间并不是孤立的,而是存在着相互制约、相互促进的复杂关系,需要进一步的研究。

3 结论

研究结果表明长期林地红壤的 pH、有机质、速效养分(除速效钾外)、微生物生物量碳及各种酶活性(除脲酶外)水平均高于大豆-油菜轮作和玉米-休闲轮作的农地土壤,因而林地比农地土壤有提升土壤质量水平的趋势。尽管大豆-油菜轮作土壤的 pH 和养分含量在大多数情况下高于玉米-休闲轮作,但轮作对各生物性质的影响并不一致,预示轮作处理对不同酶活性的敏感性可能不同。土壤有机质和 pH 与各生化指标的显著正相关性表示这两个指标可能是旱地红壤的重要土壤质量指标。

参考文献：

- [1] 李庆远,朱兆良,于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1998: 112-119
- [2] 曾希柏,李菊梅,徐明岗. 红壤旱地的肥力现状及施肥和利用方式的影响[J]. 土壤通报, 2006, 26(3): 434-437
- [3] Wallenius K, Rita H, Mikkonen A, Lappi K, Lindstrom K, Hartikainen H, Raateland A, Niemi RM. Effects of land use on the level, variation and spatial structure of soil enzyme activities and bacterial communities[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(7): 1 464-1 473

- [4] 舒世燕,王克林,张伟,何寻阳,刘淑娟,韦国富. 喀斯特峰丛洼地植被不同演替阶段土壤磷酸酶活性[J]. 生态学杂志, 2010, 29(9): 1 722-1 728
- [5] 叶伟建,黄春应,翁俊基,林明添. 不同利用方式对荒地退化红壤肥力状况的影响[J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 108-109
- [6] 李忠武,郭旺,王晓燕,申卫平,张雪,陈晓琳,张越男. 南方红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征及其与草本生物量的关系[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 867-874
- [7] 陈山,杨峰,林杉,柳淑蓉,汤水荣,蔡崇法,胡荣桂. 土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 211-217
- [8] 鲍文,赖奕卡. 湘中红壤丘陵区不同土地利用类型对土壤特性的影响[J]. 中国保持研究, 2011(10): 47-51
- [9] 刘志良,郑诗樟,石和芹. 丘陵红壤不同植被恢复方式下土壤酶活性的研究[J]. 江西农业学报, 2006, 18(6): 91-94
- [10] 薛冬,姚槐应,何振立,黄昌勇. 红壤酶活性与肥力的关系[J]. 生态学报, 2005, 6(8): 1 455-1 458
- [11] 徐华勤,章家恩,冯丽芳,全国明,毛丹娟,秦钟. 广东省不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4 112-4 119
- [12] 刘明,李忠佩,张桃林. 不同利用方式下红壤微生物生物量及代谢功能多样性的变化[J]. 土壤, 2009, 41(5): 744-748
- [13] 尹刚强,田大伦,方晰,洪瑜. 不同土地利用方式对湘中丘陵区土壤质量的影响[J]. 林业科学, 2008, 44(8): 9-15
- [14] Lepsch IF, Menk JRF, Oliveira JB. Carbon storage and other properties of soils under agriculture and natural vegetation in Sao Paulo State, Brazil[J]. Soil Use Management, 1994, 10: 34-42
- [15] Davidson EA, Ackerman IL. Changes of soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils[J]. Biogeochemistry, 1993, 20: 161-193
- [16] 官会林,段庆钟,沈有信. 不同轮作方式下高原山地红壤肥力变化特征[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(5): 116-121
- [17] 陈先茂,彭春瑞,关贤交,邵彩虹,邱才飞. 红壤旱地不同轮作模式的效益及其对土壤质量的影响[J]. 江西农业学报, 2009, 21(6): 75-77
- [18] 高菊生,曹卫东,李冬初,徐明岗,曾希柏,聂军,张文菊. 长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4 542-4 548
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 30-113
- [20] Wu J, Joergensen RG, Pommerening B, Chaussod R, Brookes PC. Measurement of microbial biomass C by fumigation-extraction—an automated procedure[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22(8): 1 167-1 169
- [21] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274-339
- [22] 蔡泽江,孙楠,王伯仁. 长期施肥对红壤 pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 71-78

- [23] 佟德利, 徐仁扣. 三种氮肥对红壤硝化作用及酸化过程影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 853–859
- [24] 方日尧. 不同豆科牧草对低缓冲土壤的酸化能力[J]. 北京农学院学报, 1999, 14(3): 1–6
- [25] Carter MR. Soil quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94(1): 38–47
- [26] Song GH, Li LQ, Pan GX, Zhang Q. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 74(11): 47–62
- [27] 杨武德, 王兆骞, 睦国平, 陈宝林, 徐锴. 红壤坡地不同利用方式土壤侵蚀模型研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 52–60
- [28] 谢小立, 王凯荣. 红壤坡地雨水地表径流及其侵蚀[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 839–845
- [29] 王德, 傅伯杰, 陈利顶. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3 081–3 089
- [30] Fullen MA, Booth CA, Brandsma RT. Long-term effects of grass ley set-aside on erosion rates and soil organic matter on sandy soils in east Shropshire, UK[J]. *Soil Tillage Research*, 2006, 89(1): 122–128
- [31] Zhao BZ, Zhang JB, Flury M, Zhu AN, Jiang QA, Bi JW. Groundwater contamination with $\text{NO}_3\text{-N}$ in a wheat-corn cropping system in the North China Plain[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(6): 721–731
- [32] Rasool R, Kukal SS, Hira GS. Soil organic carbon and physical properties as affected by long-term application of FYM and inorganic fertilizers in maize–wheat system[J]. *Soil Tillage Research*, 2008, 101(1/2): 31–36
- [33] 时正元, 鲁如坤, 顾益初. 土壤累积态磷研究 I. 一次大量施磷的产量效应[J]. 土壤, 1995, 27(2): 85–89
- [34] Sanyal SK, De Datta SK. Chemistry of phosphorus transformation in soil[J]. *Advance Soil Science*, 1991, 16: 1–12
- [35] 罗微, 林清火, 茶正早, 林钊沐. 氮肥品种对砖红壤中钾素淋溶特征的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 74–77
- [36] 张春霞, 郝明德, 魏孝荣. 不同农田生态系统土壤微生物生物量碳的变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(1): 81–83
- [37] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 89–95
- [38] 刘守龙, 苏以荣, 黄道友, 肖和艾, 吴金水. 微生物商对亚热带地区土地利用及施肥制度的响应[J]. 中国农业科学, 2006, 39(7): 1 411–1 418
- [39] Marinari S, Mancinelli R, Campiglia E, Grego S. Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy[J]. *Ecological Indicators*, 2006, 6(4): 707–711
- [40] 马冬云, 郭天财, 宋晓. 尿素施用量对小麦根际土壤微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2007, 2(12): 5 222–5 228
- [41] Acosta-Martinez V, Zobeck TM, Gill TE, Kennedy AC. Enzyme activities and microbial community structure in semiarid agricultural soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 38(4): 216–227
- [42] 王颖, 许广波, 刘文利. 苹果梨园土壤酶活性初报[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 383–386
- [43] 石宗琳, 王益权, 张露, 喻建波, 焦彩强, 冉艳玲. 渭北果园土壤有机质及酶活性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 86–91
- [44] Zhang QC, Shamsi IH, Xu DT, Wang GH, Lin XY, Jilani G, Hussain N, Chandhry AN. Chemical fertilizer and organic manure inputs in soil exhibit a vice versa pattern of microbial community structure[J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, 57: 1–8
- [45] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 舒世燕, 何寻阳, 杨珊, 潘复静. 桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被演替阶段的土壤脲酶活性[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5 789–5 796
- [46] Tabatabai MA, Fu M. Extraction of Enzymes from Soils[M]. New York: Marcel Dekker, 1992: 197–227
- [47] Tian Y, Haibara K, Toda H, Ding FJ, Liu YH, Choi DS. Microbial biomass and activity along a natural pH gradient in forest soils in a karst region of the upper Yangtze River, China[J]. *Journal of Forest Research*, 2008, 13(4): 205–214
- [48] Aciego Pietri JC, Brooks PC. Substrate inputs and pH as factors controlling microbial biomass, activity and community structure in an arable soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(7): 1 396–1 405
- [49] Bryant JA, Lamanna C, Morlon H, Kerkhoff AJ, Enquist BJ, Green JL. Microbes on mountainsides, contrasting elevational patterns of bacterial and plant diversity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(1): 11 505–11 511

Effects of Land Management and Crop Rotation on Upland Red Soil Biochemical Properties

LI Zeng-qiang^{1,2}, ZHAO Bing-zi^{1*}, ZHANG Jia-bao¹

(1 *State Experimental Station of Agro-Ecosystem in Fengqiu, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Land management and crop rotation apparently affect upland red soil productivity. This study aimed at the effects of forest land, arable soil and different crop rotation systems on soil biochemistry properties. The results of the experiment in forest land, soybean-rape rotation and maize-fallow rotation in Taoyuan County, Hunan Province showed that: in the forest lands, soil pH, organic carbon, available nutrients, microbial biomass carbon and enzyme activity (cellulase, acid phosphatase, invertase, protease) were higher than those of the arable soils. Soil pH, nutrients contents, microbial biomass carbon and microbial quotient in soybean-rape rotation were higher than those in maize-fallow rotation, but the response of enzyme activities in different crop rotation treatments was not uniform, which may be due to the differences in the soil enzyme sensitivity induced by different land management practices and crop rotation systems. There were significant relationships between different microbial indicators and soil organic carbon or pH, which indicated that the organic carbon and pH were indicators of soil quality in upland red soils. The study manifests that increasing soil organic carbon in this area is important to maintain and improve the upland red soil biochemistry properties.

Key words: Forest land, Soybean-rape rotation, Maize-fallow rotation, Soil nutrients, Microbial biomass carbon, Enzyme activity