

长期施肥对红壤旱地土壤活性有机碳和酶活性的影响^①

张继光^{1,2,3,*}, 秦江涛^{1*}, 要文倩^{1,2}, 周睿¹, 张斌¹

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3 中国农业科学院烟草研究所, 山东青岛 266101)

摘要: 以江西进贤长期肥料定位试验为平台, 研究了红壤旱地不同施肥措施对土壤微生物生物量、活性有机 C、C 库管理指数以及土壤酶活性的影响。研究结果表明: 与不施肥和单施化肥土壤相比, 施有机肥处理土壤的 pH、CEC、有机 C、全 N、全 P、无机 N、速效 P、速效 K 及土壤微生物生物量均显著增加, 土壤活性有机 C 和 C 库管理指数也较试前土壤和其他处理土壤明显提高, 此外, 土壤的转化酶、脱氢酶、脲酶和酸性磷酸酶活性也较其他处理显著增加。土壤微生物生物量、活性有机 C 以及 4 种土壤酶活性之间的相关关系显著, 且它们均与土壤有机 C、全 N、全 P、无机 N、速效 P 等土壤养分呈显著正相关。因此, 红壤旱地通过长期施用有机肥或与无机肥配施, 不仅能显著提高土壤有机质的数量和质量, 而且能增加土壤微生物生物量和酶活性, 从而显著提高土壤肥力和土壤持续生产力。

关键词: 红壤旱地; 长期施肥; 微生物生物量; 活性有机碳; 碳库管理指数; 酶活性

中图分类号: S154.2

红壤旱地作为我国南方主要耕作土壤类型之一, 是我国重要的粮食、经济作物和畜牧业基地^[1], 但由于长期不合理的开发利用, 造成土壤肥力衰退, 具体表现在土壤养分下降、酸度增加和物理性状变差等方面^[2]。如何防止红壤退化, 提高土壤生产力, 是我国南方红壤区农业可持续发展面临的一项艰巨而紧迫的任务。

土壤有机质是土壤肥力的重要标志, 但有机质总量并不能敏感地反映土壤有机质的变化。土壤微生物生物量作为土壤有机质最活跃的部分, 直接参与调控土壤有机质的转化过程, 它能够对施肥、耕作管理方式等引起有机质的改变作出迅速反应, 可以作为土壤有机质含量变化的早期预警^[3-4]。此外, 有研究者提出用不同浓度 KMnO_4 氧化的有机质作为不同活性的有机质, 并据此提出了土壤 C 库管理指数 (CMI) 的概念^[5], 由活性有机质计算得出的 CMI 可作为土壤有机质总量及其质量变化的较为系统和敏感的监测指标^[6], 是土壤管理措施引起土壤有机质变化的重要依据^[7]。

土壤中各种生化过程和物质循环均是在土壤酶的参与下完成。脱氢酶能促脱氢反应, 其活性可以看作是土壤微生物活性和功能多样性的重要指标^[8]。转化

酶不仅能表征土壤生物学活性及强度, 也可以作为评价土壤熟化程度和土壤肥力水平的指标。脲酶的酶促产物氨是植物 N 源之一, 尿素、有机肥等含 N 肥料水解与脲酶密切相关。同样磷酸酶对土壤有机 P 转化及 P 素的有效性具有重要作用, 是评价土壤 P 素生物转化方向与强度的重要指标。土壤酶活性反映了土壤中进行各种生物化学过程的动力和强度, 许多研究均表明土壤酶活性可以作为土壤肥力、土壤质量和微生物活性的重要指标^[9-11], 因此, 研究土壤酶活性对于土壤肥力的形成、提高以及土壤生态系统的物质循环过程都具有重要意义^[12]。

施肥是影响土壤肥力变化最为重要的农业措施之一, 长期不同施肥可以显著地影响土壤有机质、微生物生物量和酶活性的变化^[13-17]。目前关于退化红壤区长期定位施肥对土壤活性有机质及土壤微生物学特性的研究还开展较少^[1, 18]。本试验以红壤旱地长期肥料试验为平台, 研究长期不同施肥管理对红壤旱地土壤微生物生物量、活性有机 C 及其 C 库管理指数和土壤酶活性的影响, 旨在探索不同施肥措施和土壤化学及生物性状之间的内在联系, 为建立合理施肥制度、提高红壤肥力和土壤持续生产力提供科学依据。

①基金项目: 国家973项目 (2005CB121107) 和国家科技支撑计划项目 (2007BAD89B18) 资助。

* 通讯作者 (jtgqin@issas.ac.cn)

作者简介: 张继光 (1980—), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要从事土壤生态及土壤肥力方面的研究。E-mail: jiguang8002@163.com

1 材料与方法

1.1 试验地概况

红壤旱地长期定位试验设在江西进贤的江西省红壤研究所内(116°26'E, 28°37'N)。该区为岗地地形, 平均海拔 26 m; 亚热带季风气候, 年均温 17.7°C, 1 月份均温 5.5°C, 7 月均温 29.9°C, 年均降雨量为 1 727 mm, 降水丰富但季节分配不均, 早玉米生育期(4—7 月)和晚玉米生育期(7—10 月)内多年平均降水分别占全年降水的 37.8% 和 14.4%。

该定位试验开始于 1986 年, 试验共设 10 个施肥处理: ①不施肥处理(CK); ②施 N 肥(N); ③施 P 肥(P); ④施 K 肥(K); ⑤施 N、P 肥(NP); ⑥施 N、K 肥(NK); ⑦施 N、P、K 肥(NPK); ⑧施两倍的 N、P、K 肥(2NPK); ⑨施用 N、P、K 肥同时施新鲜猪粪(NPK+OM); ⑩施新鲜猪粪(OM)。小区面积 22.22 m², 每个处理 3 个重复, 采用随机区组排列, 种植制度采用早玉米-晚玉米-冬闲制。

肥料种类分别是尿素、钙镁磷肥和氯化钾。肥料用量分两季施用, 每季施用 N 60 kg/hm²、P₂O₅ 30 kg/hm² 和 K₂O 60 kg/hm², 新鲜猪粪施用量为 15 t/hm², P 肥、K 肥和猪粪均作为基肥, N 肥用量的 2/3 为基肥, 1/3 为追肥。土壤母质为第四纪红黏土, 土壤分类上属于老成土^[19]。试前土壤的基本性质为 pH(H₂O, 1:2.5) 6.0, 有机 C 含量 9.39 g/kg。全 N、全 P、全 K 分别为 0.98、1.42 和 15.83 g/kg, 碱解 N、速效 P(Olsen-P)、速效 K(NH₄OAc-K)分别为 60.3、12.9 和 102 mg/kg。

1.2 样品采集与测定

2008 年 3 月采集 0~20 cm 的耕层土壤, 每个小区按梅花形 5 点法采样并混匀。将样品中的根系、石块等挑出, 一部分土样尽快处理并测定土壤的微生物学性质, 另一部分土样自然风干过 2 mm 筛后测定土壤的基本理化性状。

土壤基本理化性状的测定采用常规方法^[20], 其中土壤 pH 采用 pH 计测定; 土壤阳离子交换量(CEC)采用中性乙酸铵浸提法测定; 土壤有机 C(SOC)采用 K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 氧化法测定; 土壤全 N 用半微量凯氏法测定; 土壤全 P 为 HF-HClO₄ 消煮-钼锑抗比色法测定; 土壤全 K 用 HF-HClO₄ 消煮-火焰光度计法测定; 无机 N 采用 2 mol/L KCl 浸提-流动分析仪测定; 速效

P 采用 HCl-NH₄F 法测定; 速效 K 采用 1 mol/L NH₄OAc 浸提-火焰光度计法测定。土壤微生物生物量 C、N 采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定, 其中微生物量 C 采用熏蒸提取-容量分析法测定; 微生物量 N 采用熏蒸提取-半微量定氮法^[20]测定。

土壤活性有机 C(LOC)采用 333 mmol/L KMnO₄ 氧化-分光光度计法测定^[6], 根据土壤活性有机 C 及非活性有机 C(总有机 C 与活性有机 C 之差)计算土壤 C 库管理指数(CMI), CMI 的具体计算步骤见徐明岗等^[18]的计算方法。

土壤脱氢酶活性(以 TPF 计, $\mu\text{g-TPF}/(\text{g}\cdot 24\text{h})$)采用氯化三苯基四氮唑(TTC)还原法测定^[21]; 土壤转化酶活性(以 glucose 计, $\text{mg-glucose}/(\text{g}\cdot 24\text{h})$)测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[12]; 脲酶活性($\mu\text{g-NH}_3\text{-N}/(\text{g}\cdot 24\text{h})$)采用靛酚蓝比色法测定^[12]; 土壤酸性磷酸酶活性($\text{mg-phenol}/(\text{g}\cdot 24\text{h})$)的测定采用磷酸苯二钠比色法^[12]。

1.3 统计分析

数据采用 SPSS13.0 软件和最小显著差法(Fisher's LSD)进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对土壤基本性状的影响

表 1 显示了长期使用化肥和有机肥对红壤旱地土壤基本性状的影响。结果表明, 与试验前土壤相比, 平衡施肥处理(NPK、2NPK)和施有机肥处理(NPK+OM、OM)土壤的有机 C 提高了 1.8%~19.8%, 而其他处理土壤有机 C 含量则同比下降了 5.9%~9.7%。除有机肥处理外, 其余处理土壤的 pH 也均较试前下降。土壤的全 N、全 P 含量也仅在施有机肥情况下有所提高(分别提高 8.2%~17.3% 和 3.5%~4.9%)。由于 P、K 肥及猪粪的施用, 使得相应处理土壤的速效态 P、K 含量也较试前有所提高。

各施肥处理中, 有机肥处理土壤 pH 较高, 而偏施 N 肥处理土壤(N、NK)的 pH 较低, 其中单施 N 肥处理土壤 pH 最低为 4.55。有机肥处理的 CEC 也较高, 而其他处理则相对较低且彼此之间差异不显著。土壤有机 C 及其相关化学性质(全 N, 全 P 等)在有机肥处理中最高, CK 处理中有机 C 含量最低, 单元素(N、P、K)和两元素施肥(NP、NK)处理有机 C 含量也

较低,且彼此之间差异不显著。CK、P 和 K 处理土壤的全 N 含量最低且彼此之间无显著差异。此外,由于 P、K 肥及猪粪的施用,使得相应处理土壤的速效态养分也较其他处理明显提高。

上述研究结果显示,仅 N、P、K 平衡施肥与添加

有机肥处理的土壤有机 C 较试前有所提高,特别是化肥与有机肥配施的效果最好。与 CK 相比,施有机肥能显著提高土壤 pH、CEC、全 N、全 P、无机 N、速效 P

表 1 长期施肥红壤旱地基本性状的变化

Table 1 Soil physio-chemical properties in long-term different fertilizations in Jinxian, China

施肥处理	土壤 pH	CEC (cmol/kg)	有机 C (g/kg)	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	无机 N (mg/kg)	速效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)
CK	5.40 de	12.87 b	8.48 d	0.85 ef	0.60 c	10.62 d	4.15 d	63.32 d
N	4.55 h	12.16 b	8.73 c	0.92 cde	0.60 c	16.95 b	3.94 d	57.98 d
P	5.78 c	12.53 b	8.83 c	0.82 f	0.63 c	10.26 d	15.10 cd	97.99 bc
K	5.45 d	12.67 b	8.71 c	0.85 ef	0.71 bc	9.91 d	7.28 cd	227.4 a
NP	5.24 ef	12.71 b	8.70 c	0.90 cde	0.69 bc	13.47 c	19.31 cd	54.65 d
NK	4.95 g	12.16 b	8.67 c	0.92 cd	0.63 c	13.81 c	9.62 cd	124.7 b
NPK	5.14 f	13.12 b	9.56 b	0.93 c	0.71 bc	12.25 c	28.71 c	136.7 b
2NPK	5.11 fg	12.83 b	10.14 ab	0.97 c	0.84 b	18.49 b	40.37 b	270.7 a
NPK+OM	6.15 b	14.30 a	11.25 a	1.15 a	1.49 a	23.43 a	196.2 a	236.7 a
OM	6.50 a	14.69 a	10.81 a	1.07 b	1.47 a	24.82 a	176.4 a	134.0 b

注:同一列字母不同表示差异显著(LSD, $p < 0.05$),下表同。

效 P 等土壤性质,这与其他研究者对红壤、褐潮土和壤土的研究结果基本一致^[7, 16, 18, 22-23]。

各施肥处理中,有机肥处理土壤 pH 较高,而偏施 N 肥处理土壤(N、NK)的 pH 较低,其中单施 N 肥处理土壤 pH 最低为 4.55。有机肥处理的 CEC 也较高,而其他处理则相对较低且彼此之间差异不显著。土壤有机 C 及其相关化学性质(全 N、全 P 等)在有机肥处理中最高,CK 处理中有机 C 含量最低,单元素(N、P、K)和两元素施肥(NP、NK)处理有机 C 含量也较低,且彼此之间差异不显著。CK、P 和 K 处理土壤的全 N 含量最低且彼此之间无显著差异。此外,由于 P、K 肥及猪粪的施用,使得相应处理土壤的速效态养分也较其他处理明显提高。

上述研究结果显示,仅 N、P、K 平衡施肥与添加有机肥处理的土壤有机 C 较试前有所提高,特别是化肥与有机肥配施的效果最好。与 CK 相比,施有机肥能显著提高土壤 pH、CEC、全 N、全 P、无机 N、速效 P 等土壤性质,这与其他研究者对红壤、褐潮土和壤土的研究结果基本一致^[7, 16, 18, 22-23]。

2.2 长期施肥对土壤微生物生物量、活性有机碳及碳

库管理指数的影响

长期不同施肥能显著影响土壤微生物生物量的大小(表 2),其中单施化肥处理土壤的微生物生物量含量较低,微生物生物量 C、N 的平均值分别为 182.13 mg/kg 和 14.78 mg/kg。而施用有机肥则显著提高了土壤的微生物生物量($p < 0.05$),其中有机肥和化肥配施处理土壤的微生物生物量 C、N 最高,分别是 361.87 mg/kg 和 39.17 mg/kg,单施有机肥处理的次之,分别是 326.88 mg/kg 和 37.56 mg/kg。在所有施化肥处理中,N 处理土壤的微生物生物量 C、N 最低,K 处理次之,而 2NPK 处理最高。由此可见,2NPK 平衡施化肥处理其土壤微生物生物量显著高于单施化肥和 CK ($p < 0.05$),而有机肥处理的土壤微生物生物量又显著高于 2NPK 施肥处理,究其因可能是长期高量 N、P、K 平衡施肥特别是施用有机肥后,不仅可以通过增加作物产量,提高残茬返还和根系分泌物而增加土壤有机质,提供能量和 C 源底物;而且可以改善土壤微环境,创造适宜微生物生长的生境,从而利于微生物生物量的增加。

表 2 长期不同施肥对土壤微生物生物量、活性有机 C 与 C 库管理指数的影响

Table 2 Effects of long-term different fertilizations on soil microbial biomass, liable organic carbon and carbon management index (CMI)

施肥处理	微生物生物量 C (mg/kg)	微生物生物量 N (mg/kg)	活性有机 C (g/kg)	C 库管理指数 (CMI)
CK	100.57 e	7.35 e	1.54 c	89.36 b
N	103.15 e	7.17 e	1.44 c	77.72 c
P	150.34 d	11.56 d	1.46 c	77.99 c
K	139.15 de	9.43 de	1.51 c	83.07 bc
NP	221.26 c	16.78 c	1.52 c	83.73 bc
NK	173.75 d	15.73 c	1.62 b	90.58 b
NPK	217.67 c	18.93 c	1.72 b	94.97 b
2NPK	269.60 b	23.85 b	1.78 b	97.47 b
NPK+OM	361.87 a	39.17 a	2.08 a	115.71 a
OM	326.88 a	37.56 a	2.10 a	118.51 a

注：初始土壤（1986 年）的活性有机 C 为 1.79 g/kg。

从表 2 可见，长期施肥对土壤活性有机 C 及其 C 库管理指数（CMI）也有显著影响。与试前土壤相比（活性有机 C 为 1.79 g/kg），随着施肥和耕作年限的增加，有机肥处理的土壤活性有机 C 呈上升趋势，N、P、K 平衡施肥处理活性有机 C 变化不大，而 CK 和单元素及两元素施肥处理的土壤活性有机质均呈不同程度的下降，其中单施 N 肥含量最低（1.44 g/kg），比试前降低了 19.6%。土壤的 C 库管理指数也具有类似变化趋势，和试前土壤相比，单施 N 肥的 CMI 下降最多，为 22.3，而 NPK+OM 和 OM 处理的 CMI 则分别增加了 15.7 和 18.5。此外，单元素施肥处理的土壤活性有机 C 在总有机 C 中所占比例也较试前下降。而且经过 21 年的施肥和耕作管理后，CK 和不平衡施肥处理的土壤总有机 C 较初始土壤下降了 15.4%，而活性有机 C 仅下降 7.2%，说明无肥或不平衡施肥处理土壤有机 C 的降低主要是由于土壤非活性有机 C 的变化造成的。而在施有机肥处理中，土壤总有机 C 平均增加 17.8%，活性有机 C 也增加了 16.8%，说明施用有机肥在增加土壤总有机 C 的同时，活性有机 C 也同步增加。

土壤活性有机 C 是土壤中有有效性较高、易被土壤微生物分解矿化、对植物养分供应有最直接作用的有机 C。土壤中的活性有机 C 虽然含量较少，但相对于总有机 C 对施肥管理措施的反应比较敏感。而且由土壤活性有机 C 得出的土壤 C 库管理指数能够反映农作

措施使土壤质量变化或更新的程度^[5, 24]，能够较全面和动态地反映外界条件对土壤有机质性质的影响^[7]。本研究中，CK 和不平衡施肥土壤的活性有机 C 和 CMI 不断下降，这说明土壤肥力持续退化，其原因可能是一方面土壤连年耕翻，加速了有机 C 的分解；另一方面这些处理中作物产量较低，归还给土壤的植物残体较少，不能有效补偿土壤原有有机 C 的消耗^[25-26]。而施用有机肥或其配施化肥处理的土壤活性有机 C 和 CMI 均较试前上升，表明施用有机肥对红壤旱地有明显培肥作用，土壤性能向良性状态发展。因此，在养分本底贫瘠的红壤旱地上，大量施用有机肥或与化肥配合施用，不仅能明显提高土壤有机质含量，而且能显著改善土壤有机质质量，从而有效提高土壤肥力水平和土壤生产力。

2.3 长期施肥对土壤酶活性的影响

图 1 显示了长期不同施肥对红壤旱地土壤转化酶、脱氢酶、脲酶和酸性磷酸酶活性的影响。不同施肥处理中土壤的 4 种酶活性均表现出较大差异。研究发现土壤转化酶活性为 6.43 ~ 11.58 mg-glucose/(g·24h) 之间，均值为 8.56 mg-glucose/(g·24h)，其中施用有机肥土壤转化酶活性最高，2NPK 平衡施肥次之，但与有机肥处理差异不显著。土壤脱氢酶活性变幅较大，在 0.011 ~ 1.92 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot 24\text{h})$ 之间，N 和 NK 处理土壤脱氢酶活性最小，而施有机肥处理土壤的脱氢酶活性最高，均值为 1.91 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot 24\text{h})$ ，P 处理

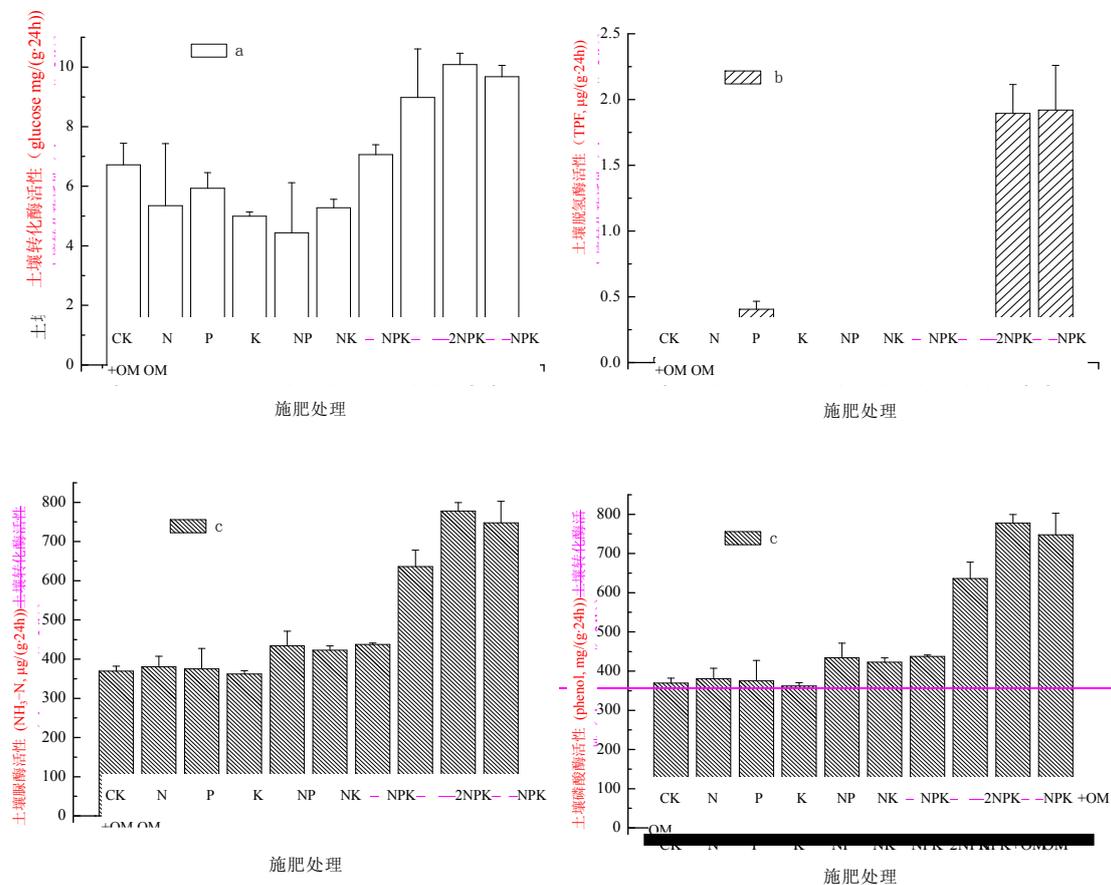
次之，仅为 $0.41 \mu\text{g} \cdot \mu\text{g}/(\text{g} \cdot 24\text{h})$ 。此外，不同施肥处理也显著影响土壤脲酶活性，脲酶活性变幅在 $361.85 \sim 778.06 \mu\text{g} \cdot \mu\text{g} \cdot \text{NH}_3\text{-N}/(\text{g} \cdot 24\text{h})$ 之间，施有机肥处理土壤的脲酶活性最高，均值为 $763.02 \mu\text{g} \cdot \mu\text{g} \cdot \text{NH}_3\text{-N}/(\text{g} \cdot 24\text{h})$ ，2NPK 处理次之，为 $636.18 \mu\text{g} \cdot \mu\text{g} \cdot \text{NH}_3\text{-N}/(\text{g} \cdot 24\text{h})$ ，其他处理土壤脲酶活性相对较小且彼此之间差异不显著。同样，不同施肥处理也显著影响土壤酸性磷酸酶的活性，各施肥处理土壤磷酸酶变幅在 $1.32 \sim 2.49 \text{mg} \cdot \text{phenol}/(\text{g} \cdot 24\text{h})$ 之间，其中施有机肥处理土壤的磷酸酶活性最高，均值为 $2.49 \text{mg} \cdot \text{phenol}/(\text{g} \cdot 24\text{h})$ 。2NPK，NPK，NK 和 N 处理次之，而 CK，P，K，NP 最低，其中有机肥处理的土壤磷酸酶活性约是所有化肥处理的 1.5 倍。总之，在红壤旱地长期定位试验中，与不施肥和单施化肥相比，施用有机肥一般能明显提高土壤的转化酶、脱氢酶、脲酶和酸性磷酸酶的活性。

由于土壤酶主要来自微生物，它与土壤微生物的丰富程度和活性密切相关，土壤酶活性可用来表征因

农业措施而导致的土壤质量改变的早期变化^[10, 27]。土壤脱氢酶常被认为是土壤微生物活性的一个有效指标^[28]，土壤转化酶、脲酶、磷酸酶等水解酶活性能够表征土壤 C、N、P 等养分的循环状况。本研究中，长期不同施肥对土壤酶活性有显著影响，其原因可能是长期不同施肥导致土壤的微生物生物量、微生物区系组成以及代谢过程发生改变，使得主要由微生物产生的土壤酶的数量和活性发生变化所致^[16]。而且 4 种土壤酶活性均以施有机肥处理为最高，这说明有机肥的施用不仅加速了土壤中 C、N、P 等元素循环，而且有助于提高土壤微生物活性和土壤肥力水平，并明显改善土壤质量。

2.4 土壤活性有机碳、微生物生物量、酶活性及土壤基本性状之间的相关性

表 3 显示了长期施肥条件下土壤活性有机 C、微生物生物量和土壤酶活性之间的相关关系。土壤活性



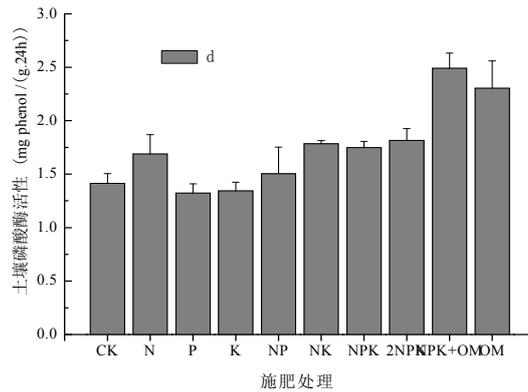


图 1 长期不同施肥对红壤旱地土壤转化酶 (a)、脱氢酶 (b)、脲酶 (c) 和磷酸酶 (d) 活性的影响

Fig. 1 Effect of long-term different fertilizations on soil invertase (a), dehydrogenase (b), urease (c) and phosphatase (d) activities

有机 C、微生物生物量 C、微生物生物量 N 均与 4 种土壤酶活性呈显著相关 ($p < 0.05$) 或极显著相关 ($p < 0.01$)。而 4 种土壤酶活性的相关关系显示, 除土壤转化酶与磷酸酶活性相关不显著外, 其他土壤酶活性彼此之间呈显著或极显著相关。从表 4 中可以看出, 土壤的活性有机 C、微生物生物量以及

土壤脲酶和脱氢酶活性均与土壤 pH、有机 C、全 N、全 P、无机 N 和速效 P 呈显著正相关, 此外土壤的转化酶和磷酸酶活性与除 pH 外的上述土壤性质也存在显著相关关系, 而土壤性质中的 C/N 与上述土壤活性有机 C 和各微生物指标间均不存在显著相关性。

2.4 土壤活性有机碳、微生物生物量、酶活性及土壤基本性状之间的相关性

土壤转化酶活性 (glucose-mg/(g·24h)) 条件下土壤活性有机 C、微生物生物量和土壤酶活性之间的相关性。土壤活性有机 C、微生物生物量 C、微生物量 N 均与 4 种土壤酶活性呈显著相关 ($p < 0.05$) 或极显著相关 ($p < 0.01$)。而 4 种土壤酶活性的相关关系显示, 除土壤转化酶与磷酸酶活性相关不显著外, 其他土壤酶活性彼此之间呈显著或极显著相关。从表 4 中可以看出, 土壤的活性有机 C、微生物生物量以及土壤脲酶和脱氢酶活性均与土壤 pH、有机 C、全 N、全 P、无机 N 和速效 P 呈显著正相关, 此外土壤的转化酶和磷酸酶活性与除 pH 外的上述土壤性质也存在显著相关关系, 而土壤性质中的 C/N 与上述土壤活性有机 C 和各微生物指标间均不存在显著相关性。

土壤转化酶活性 (glucose-mg/(g·24h))

表 3 土壤活性有机 C 碳、微生物生物量和酶活性指标之间的相关性

Table 3 Correlation matrix among active organic carbon, microbial biomass and soil enzymes

变量	微生物生物量 C	微生物生物量 N	转化酶活性	脲酶活性	脱氢酶活性	磷酸酶活性
活性有机 C	0.923**	0.970**	0.923**	0.956**	0.860**	0.929**
微生物生物量 C		0.981**	0.672*	0.946**	0.787**	0.859**
微生物生物量 N			0.702*	0.970**	0.872**	0.919**
转化酶活性				0.754*	0.652*	0.610
脲酶活性					0.843**	0.918**
脱氢酶活性						0.828**

注: *, ** 分别表示 $p < 0.05$, $p < 0.01$ 的显著性水平, 下同。

表 4 土壤活性有机 C、微生物生物量、酶活性和土壤理化性质的相关性

Table 4 Correlation matrix between active organic carbon, microbial biomass, soil enzymes and soil parameters

变量	土壤 pH	有机 C	全 N	C/N	全 P	无机 N	速效 P
活性有机 C	0.699*	0.946**	0.925**	-0.158	0.945**	0.840**	0.937**

微生物生物量 C	0.642*	0.850**	0.885**	-0.291	0.887**	0.760*	0.882**
微生物生物量 N	0.706*	0.907**	0.926**	-0.256	0.947**	0.838**	0.944**
转化酶活性	0.586	0.953**	0.838**	0.105	0.819**	0.784**	0.818**
尿酶活性	0.651*	0.944**	0.935**	-0.190	0.938**	0.891**	0.927**
脱氢酶活性	0.871**	0.824**	0.821**	-0.152	0.964**	0.828**	0.975**
磷酸酶活性	0.507	0.940**	0.989**	-0.349	0.895**	0.933**	0.907**

尽管土壤酶活性与土壤质量之间的关系还没有明确,但土壤中许多酶与微生物呼吸、微生物种类及数量、有机 C 含量之间存在显著相关关系^[15, 29]。本研究中土壤有机 C、全 N、全 P、无机 N、速效 P 与 4 种土壤酶活性均呈极显著相关,表明红壤旱地肥力水平的提高,可以显著增加土壤酶活性,增强土壤对作物的养分供应。同时由于土壤酶对因环境或管理因素引起的变化较为敏感,土壤酶活性也可以客观地反映土壤肥力状况和土壤养分(尤其是 N、P)转化的强弱^[14]。而且本研究结果进一步验证了包含微生物生物量、活性有机 C 和土壤酶活性的土壤微生物特性可以作为长期施肥条件下土壤肥力变化的重要指标。

3 小结

(1) ~~(1)~~ 红壤旱地 21 年的长期施肥和耕作能够明显改变土壤的理化性质,其中平衡施化肥与施有机肥处理土壤的有机 C 均较试前提高,与对照相比,施用有机肥后能明显提高土壤的 pH、CEC、全 N、全 P、无机 N、速效 P 等土壤性质,特别是化肥与有机肥配施对提高土壤肥力的效果最好。

(2) ~~(2)~~ 长期施肥特别是施有机肥能显著提高土壤的微生物生物量、活性有机 C 和 C 库管理指数。与试前相比,平衡施化肥处理活性有机 C 变化不大,施有机肥土壤的活性有机 C 和 C 库管理指数显著提高,大量持续施用有机肥或与化肥配施能起到显著改善土壤有机质质量的作用。

(3) ~~(3)~~ 长期不同施肥可以显著影响土壤脱氢酶、尿酶、转化酶和酸性磷酸酶的活性。一般的,与不施肥和单施化肥相比,施用有机肥处理可以显著提高 4 种土壤酶的活性,且 2 倍 NPK 处理也能明显提高土壤转化酶和脲酶活性,但不平衡施肥和对照处理间土壤酶活性的差异总体不显著。

(4) 土壤活性有机 C、微生物生物量和土壤酶活性之间相关显著,而且它们均与土壤的有机 C、全 N、全 P、无机 N 和速效 P 等土壤性质显著相关。因此红壤旱地增施有机肥,可以改善土壤的理化性状,增加土壤酶活性,有效提高土壤的肥力水平和综合生产能

力。

参考文献:

- [1] 徐明岗,梁国庆,张夫道. 中国土壤肥力演变. 北京: 中国农业出版社, 2006
- [2] 章明奎,徐建民. 亚热带低丘区退化红壤肥力质量恢复性能的研究. 水土保持学报, 2002, 16(1): 67-71
- [3] Brookes PC. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, 19: 269-279
- [4] Manjaish KM, Voroney RP, Sen U. Soil organic carbon stocks, storage profile and microbial biomass under different crop management systems in a tropical agricultural ecosystem. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32: 273-278
- [5] Blair GJ, Lefroy RDB, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agriculture Research*, 1995, 46: 1 459-1 466
- [6] Lefroy RDB, Lisle L. Soil organic carbon changes in cracking clay soils under cotton production as studied by carbon fractionation. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1997, 48: 1 049- 1058
- [7] 徐明岗,于荣,孙小凤,刘骅,王伯仁,李菊梅. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 459-465
- [8] 秦华,林先贵,陈瑞蕊,尹睿. DEHP 对土壤脱氢酶活性及微生物功能多样性的影响. *土壤学报*, 2005, 42(5): 829-834
- [9] 路磊,李忠佩,车玉萍. 不同施肥处理对黄泥土微生物生物量碳氮和酶活性的影响. *土壤*, 2006, 38(3): 309-314
- [10] 张逸飞,钟文辉,李忠佩,蔡祖聪. 长期不同施肥处理对红壤水稻土酶活性及微生物群落功能多样性的影响. *生态与环境学报*, 2006, 26(4): 39-44
- [11] Caravaca F, Alguacil MM, Figueroa D, Barea JM, Roldán A. Re-establishment of *Retama sphaerocarpa* as a target species for reclamation of soil physical and biological properties in a semi-arid Mediterranean area. *Forest Ecology and Management*, 2003, 182: 49-58

- [12] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1983
- [13] Belay A, Claassens AS, Wehner FC. Effect of direct nitrogen and potassium and residual phosphorus fertilizers on soil chemical properties, microbial components and maize yield under long-term crop rotation. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35: 420-427
- [14] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 徐晶, 张夫道. 长期定位施肥对土壤酶活性及其调控土壤肥力的作用. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(4): 406-410
- [15] 李娟, 赵秉强, 李秀英, Hwat BS. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 144-152
- [16] 刘恩科, 赵秉强, 李秀英, 姜瑞波, 李燕婷, Hwat BS. 长期施肥对土壤微生物量及土壤酶活性的影响. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 176-182
- [17] 颜慧, 钟文辉, 李忠佩, 蔡祖聪. 长期施肥对红壤水稻土磷脂脂肪酸特性和酶活性的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 71-75
- [18] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化. *土壤学报*, 2006, 43(5): 723-729
- [19] Soil Survey Staff. ~~1998~~. *Keys to Soil Taxonomy*. 8th ed. Washington, DC: USDA. Nat. Resour. Conserv. Serv., Washington, DC: 1998
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [21] Chu HY, Zhu JG, Xie ZB, Zhang HY, Cao ZH, Li ZG. Effects of lanthanum on dehydrogenase activity and carbon dioxide evolution in a Haplic Acrisol. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41: 731-739
- [22] 李文祥. 长期不同施肥对壤土肥力及作物产量的影响. *中国土壤与肥料*, 2007(2): 23-25
- [23] 陈磊, 郝明德, 张少民, 樊虎玲. 黄土高原旱地长期施肥对小麦养分吸收和土壤肥力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(2): 230-235
- [24] Whitbread AM, Lefroy RDB, Blair GJ. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36: 669-682
- [25] Kuzyakov Y, Domanski G. Carbon input by plants into the soil: Review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2000, 163: 421-431
- [26] 沈宏, 曹志洪, 王志明. 不同农田生态系统土壤碳库管理指数的研究. *自然资源学报*, 1999, 14(3): 206-221
- [27] Lalonde R, Gaonon B, Simard RR. Microbial biomass and alkaline phosphates activity in two composted amended soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 1998, 78: 581-587
- [28] Visser S, Parkinson D. Soil biological criteria as indicators of soil quality: ~~soil~~ Soil microorganisms. *American Journal of Alternative Agriculture*, 1992, 7: 33-37
- [29] 刘骅, 林英华, 张云舒, 谭新霞, 王西和. 长期施肥对灰漠土生物群落和酶活性的影响. *生态学报*, 2008, 28(8): 3 899- 3 904

Effects of Long-Term Fertilization on Soil Active Organic Carbon and Soil Enzyme Activities in Upland Red Soils

ZHANG Ji-guang^{1,2-3,}, QIN Jiang-tao¹, YAO Wen-qian^{1,2}, ZHOU Rui¹, ZHANG Bin¹

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

3 *Tobacco Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qingdao, Shandong 266101, China*)

Abstract: Soil fertility is important for the sustainable development of red soil agroecosystem. In this paper, soil microbial biomass, soil active organic carbon, carbon management index (CMI) and soil enzymes activities were studied in upland soils under different fertilizer applications in a 21a long-term fertilization experiment. Results showed that soil pH, CEC, SOC, total N, total P, mineral N, available P, available K and soil microbial biomass in manure fertilization treatments (NPK+OM and OM) all increased significantly compared with no fertilization (CK) and mineral fertilization treatments (N, P, K, NP, NKP, NPK and 2NPK). The active organic carbon and carbon management index also significantly increased and more than the original soil and other fertilization treatments. Furthermore, the soil invertase, dehydrogenase, urease and acid phosphatase activities were all significantly higher than those in other fertilization treatments. There were significant correlations between soil microbial biomass, active organic carbon and the four soil enzymes activities, and these soil microbial properties were all positively correlated with soil pH, SOC, total N, total P, mineral N and available P except for the correlations between soil invertase, phosphatase and soil pH. So, manure application or co-application of manure and mineral fertilizers not only increased the quantity and quality of soil organic matter, but also enhanced significantly soil microbial biomass and soil enzymes activities, thus could improve red soil fertility and soil sustainable productivity.

Key words: Red upland, Long-term fertilization, Soil microbial biomass, Active organic mater, Carbon management index (CMI), Soil enzyme