



## 湘南3种典型红壤生土长期施肥对块根作物产量影响

高菊生<sup>1,2</sup>, 黄晶<sup>1,2</sup>, 徐明岗, 曹卫东<sup>1</sup>, 董春华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 北京 100081;

<sup>2</sup>中国农业科学院衡阳红壤实验站/祁阳农田生态系统国家野外试验站, 湖南祁阳 426182)

**摘要:**为了全面系统地研究土壤熟化这一复杂的过程, 寻求适宜的熟化方式, 为开发利用红壤丘陵区各种荒地资源、生产示范、科学规划提供依据。以长期定位试验为基本材料, 采用田间试验方法, 从1982年开始, 研究了湘南3种典型红壤生土长期施肥对块根作物——红薯产量的影响。结果表明: 3种母质红薯以紫色土上产量最高; 紫色土红薯以处理4、处理3产量最高; 3种母质红薯块根产量都以处理1最差。紫色土红薯块根产量依次为: 处理4 > 处理3 > 处理6 > 处理5 > 处理2 > 处理1; 花岗岩红薯产量依次为: 处理6 > 处理5 > 处理4 > 处理3 > 处理2 > 处理1; 四纪红土红薯产量依次为: 处理6 > 处理4 > 处理3 > 处理5 > 处理2 > 处理1; 花岗岩、四纪红土处理3和处理4的小区中间80%部分没有产量, 只有靠小区水泥埂边缘有红薯; 3种母质的红薯块根产量都以地上部作物秸秆还田的处理好于不还田处理。

**关键词:** 长期施肥; 典型红壤生土; 块根作物; 产量

中图分类号: S511.4

文献标志码: A

论文编号: 2011-0822

### Influence of Long Term Fertilizer Application on Output of Root Crops (Sweet Potato) in Three Kinds of Typical Parent Material Soils in South Hunan

Gao Jusheng<sup>1,2</sup>, Huang Jing<sup>1,2</sup>, Xu Minggang<sup>1</sup>, Cao Weidong<sup>1</sup>, Dong Chunhua<sup>1,2</sup>,

<sup>1</sup>Institute of Agricultural Resources and Regional Planning CAAS, Beijing 10081, China;

<sup>2</sup>Institute of Agricultural Resources and Regional Planning CAAS/Qiyang Agro-ecosystem of National Field Experimental Station, Qiyang 426182, Hunan, China)

**Abstract:** The influence of 28 years fertilizer application to soil on the outputs of root crops (sweet potato) was studied from 1982 to 2009 in three kinds of typical parent material soils in South Hunan under long-term location test. The results showed that among the three kinds of typical parent material soils, the yield of sweet potato planted in purple soil gave the highest annual output, and NPK treatment in purple soil gave the highest annual output. The CK treatment without fertilizer obtained the lowest yield. The root yield (underground) of sweet potato planted in the purple soils was in sequence of NPK > OM > CK, while the root yield (underground) of sweet potato planted in the quaternary red soil or the granitization red soil was in sequence of OM > NPK > CK. Among the NPK treatment in quaternary red soil and granitization red soil, 80% of plots had no output, and only in the region near the edge of district cement stalk did sweet potato grow. Among the root yield (underground) of sweet potatoes planted in three kinds of parent material soils (6 treatments in each parent material), the treatment of aboveground crop straw returning to field was better than the treatment of removing the aboveground crop straw away.

**Key words:** Long-term Fertilizer Application; Typical Material Red Soils; Root Crops; Crop Production

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203030)、(201103005)资助。

第一作者简介: 高菊生, 男, 1963年出生, 湖南祁阳人, 高级农艺师, 研究方向: 水稻、旱地长期定位试验及作物栽培与土壤改良。通信地址: 426182 湖南祁阳官山坪, Tel: 0746-3841016, E-mail: gjusheng@163.com。

收稿日期: 2011-10-08, 修回日期: 2011-11-04。



## 0 引言

湘南红壤丘陵区水热条件优越,各种荒地资源越来越受到人们的关注,然而要开发这些土壤资源,必须从生土熟化入手<sup>[1]</sup>。湘南红壤生土土壤板结、无团粒结构、理化性质恶劣、生物活性弱、肥力贫瘠,即“瘦”、“硬”、“死”为其主要农业生产特性,也是直接影响作物生长发育,导致减产的主要原因<sup>[2-5]</sup>。因此,为高效利用红壤荒地资源,红壤生土快速培肥熟化,并尽快促使作物高产,是目前急需解决的问题。前人已生土熟化培肥和促使作物高产方面做了大量研究<sup>[6-11]</sup>,其主要包括秸秆还土、有机无机肥单施和配施、施用菌肥、配方施肥及合理灌溉和加强田间管理等措施,认为有机无机肥配施与秸秆还田综合处理,是一种快速培肥生土并促进作物高产的较好技术措施<sup>[12-13]</sup>。但这些研究大多体现的是短期效应,缺乏土壤肥料定位试验所需的长期性,也没有体现出气候的重复性和复杂性作用。

为全面系统地研究湘南红壤生土熟化这一相当复杂的过程,寻求适宜的熟化方式,中国农业科学院红壤实验站于1982年起,在湖南祁阳官山坪位布置了湘南

3种典型红壤生土的长期熟化试验。在生土熟化过程中,对试验中种植的十字花科(油菜、萝卜等)<sup>[14]</sup>、禾本科(小麦、黑麦草等)<sup>[15]</sup>、豆科(黄豆、花生等)<sup>[16-17]</sup>3种作物的相关性状和产量进行了分析研究<sup>[18]</sup>。结果表明,经过多年熟化后,土壤的理化性质<sup>[19]</sup>、养分<sup>[20]</sup>和有机质<sup>[21]</sup>、土壤磷组分<sup>[22]</sup>的发生明显变化,土壤肥力综合指数显著提高<sup>[23]</sup>,且与作物产量显著相关。但是,对于块根作物在湘南红壤生土化熟过程中不同年份的产量变化,尚缺乏有关报道。为此,笔者将对块根作物——红薯在湘南红壤生土化熟过程中不同年份的产量变化进行系统总结,为湘南红壤生土培肥熟化、持续农业发展及生产示范和领导决策提供实践基础和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

供试的3种生土分别是由第四纪红土母质、花岗岩母质和紫色砂页岩母质发育而来。每6个池装填同种土壤。试验前(1982年)的土壤基本理化性质见表1。

### 1.2 试验地概况

试验于1982年在中国农业科学院红壤实验站的

表1 供试3种土壤的基本理化性质(1982年)

母质	pH	有机质 /(g/kg)	全氮 /(g/kg)	全磷 /(g/kg)	全钾 /(g/kg)	碱解氮 /(mg/kg)	速效磷 /(mg/kg)	速效钾 /(g/kg)	土壤质地	田间持水量/%
花岗岩	6.84	2.8	0.12	0.13	46.6	2.8	104.8	39.1	砂质粘壤土	17.6
第四纪红土	5.65	5.6	0.5	0.27	15.7	3.3	81.4	46.6	粘土	20.6
紫色砂页岩	8.86	3.9	0.38	0.53	28.9	5.5	97.7	25.6	砂质壤土	16.7

网室内进行。该站位于东经111°52',北纬26°45',海拔150~170 m,年平均温度为17.8℃,>10℃的积温为5648℃,年降水量1290 mm,无霜期293天,年日照时数1613 h,年平均总辐射108.66 kcal/cm<sup>2</sup><sup>[24]</sup>。试验共有3×6个水泥池,每个水泥池长4 m,宽2 m,深1 m,不封底。每6个池装填1种土壤,共3种土壤,分别是第四纪红土母质发育的、花岗岩母质发育的生土和紫色土发育的生土。

### 1.3 试验设计

每种土壤分6个处理。处理1:对照(取走地上全部生物体,CK-T);处理2:对照(CK,归还全部生物体。CK-R);处理3:施NPK肥(取走地上全部生物体,NPK-T);处理4:施NPK肥(归还全部生物体,NPK-R);处理5:施用有机物-稻草(取走地上全部生物体,OM-T);处理6:施用有机物-稻草(归还全部生物体,OM-R)。对照区不施入任何物质到土壤中去。小区面积:2 m×4 m=8 m<sup>2</sup>,施肥量:每hm<sup>2</sup>施N 75 kg, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg, K<sub>2</sub>O 75 kg。

肥料种类:(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (352.5 kg/hm<sup>2</sup>)、过磷酸钙(750 kg/hm<sup>2</sup>)、氯化钾(120 kg/hm<sup>2</sup>)、干稻草(1251.0 kg/hm<sup>2</sup>,有机物-干稻草以15%水分计算,干稻草用量:0.283 kg+0.6 kg+0.095 kg=0.98 kg/区)。施用的稻草量为干草0.98 kg/区,(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.283 kg/区,CaHPO<sub>4</sub> 0.6 kg/区,KCl 0.095 kg/区。所有肥料作基肥一次施入,以后不再追肥。种植作物:禾本科、豆科、十字花科、块根作物轮作<sup>[18]</sup>。

每年10月秋季作物收获后采集0~20 cm耕层混合样,经风干细化(过0.25 mm和1 mm筛)后测定:有机质采用外加热-重铬酸钾容量法,全氮采用半微量开氏法,全磷采用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>4</sub>消化钼锑抗比色法,全钾采用NaOH熔融火焰光度法,碱解氮采用1 mol/L NaOH扩散法,速效磷采用0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub>浸提钼锑抗比色法,速效钾采用1 mol/L醋酸铵浸提火焰光度法,pH采用电位法(1:5)测定<sup>[25]</sup>。田间持水量采用威尔科克斯法测定<sup>[26]</sup>。

### 1.5 数据处理方法

采用 Microsoft Excel 2003 进行数据计算, SPSS13.0 进行结果的统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同母质长期施肥块根作物年总产量变化

1982—2009 年研究结果表明:3 种母质红薯年总产量(鲜重,包括地上部和块根)以紫色土最高(380490.3 kg/hm<sup>2</sup>),其次是花岗岩红壤(285342.9 kg/hm<sup>2</sup>),第四纪红壤最低(216408.1 kg/hm<sup>2</sup>) (图1)。这主要是由于紫色土母质含有较多矿物质,肥力高。因此,针对紫色砂页岩土壤,只要进行合理施肥,改善土壤的结构及土壤酸环境,促进土壤微生物活动就能发挥土壤潜能。而红壤类母质发育土壤由于其酸、瘦、粘、板等原因其作物产量一直保持较低水平。花岗岩风化发育的土壤具有土层深厚、土体疏松,淋溶现象十分明显,盐基不饱和,呈酸性等特点<sup>[26]</sup>。一般全钾含量较高(麻砂泥田全钾为 4.09%),全磷含量较少(麻砂泥田全磷为 0.094%)。紫色砂、页岩风化发育的土壤由于受淋溶强弱和所含胶结物的种类不同,酸碱度有酸性、中性与碱性差异,土壤质地一般为砂壤土至中壤土,富含磷钾钙(全钾 2.3%~3.0%,全磷 0.17%,全钙 2.1%~2.6%)等养分,一般具有良好的结构性和通透性,适种性广,有利于种植块根、块茎、豆类型、油料等作物<sup>[27]</sup>。第四纪红色粘土母质,土体构造保留着较明显的红土层,网纹层和砾石层。一般红土层较粘重,养分含量低(全钾 1.5%左右,全磷 0.08%~0.1%左右),呈酸性<sup>[6]</sup>。

### 2.2 不同母质不同处理红薯产量变化

由表 2~4 可知,3 种母质红薯产量都以处理 1 最差。紫色土红薯产量依次为:处理 4>处理 3>处理 6>处理 5>处理 2>处理 1;花岗岩红薯产量依次为:处理 6>处理 5>处理 4>处理 3>处理 2>处理 1;四

纪红土红薯产量依次为:处理 6>处理 4>处理 3>处理 5>处理 2>处理 1;花岗岩、四纪红土处理 3、处理 4 25 年后发现:小区中间 80% 部分没有产量,只有靠小区水泥埂边缘有红薯。这可能是由于长期施用化肥,导致土壤 pH 下降,土壤酸化,从而产生铝毒。而长期施用有机物(干稻草),土壤有机质逐年增加,土壤中的 NPK 分布平衡。根据曾希柏等<sup>[12]</sup>研究表明,3 种不同母质的施肥处理,pH 下降幅度最大的是 NPK 处理,下降幅度较小的是施用有机物处理。

从表 2~4 中还可以看出,3 种母质的红薯产量都以秸秆还田的处理好于秸秆不还田的处理。根据于寒青等<sup>[20]</sup>对本长期试验研究:施有机物稻草能够促进土壤有机质含量积累,秸秆还田对提升有机质含量具有更好的效果,这主要是因为秸秆还田的处理中进入土壤有机物(根系、留茬和秸秆)的数量比不还田的数量多。有机无机物料配合施用是提高土壤肥力的重要手段,秸秆还田措施对提高土壤肥力也有一定积极作用。

## 3 结论及讨论

3 种母质红薯以紫色土最好(年总产量最高);紫色土红薯以处理 4、处理 3 最好(年总产量最高);3 种母质红薯块根产量都以处理 1 最差。其中,紫色土红薯块根产量依次为:处理 4>处理 3>处理 6>处理 5>处理 2>处理 1;花岗岩红薯产量依次为:处理 6>处理 5>处理 4>处理 3>处理 2>处理 1;四纪红土红薯产量依次为:处理 6>处理 4>处理 3>处理 5>处理 2>处理 1;25 年后发现花岗岩、四纪红土的处理 3、处理 4 小区中间 80% 部分没有产量,只有靠小区水泥埂边缘有红薯。3 种母质的红薯块根产量都以秸秆还田的处理好于秸秆不还田的处理。

在自然条件下,土壤的发育过程受地形、母质、生物、气候和时间五大因素影响,是一个缓慢的过程。但当人类的活动影响加入,土壤中物质和能量的交换速度明显加快,土壤的生产能力也明显加强,因此,土壤肥力的变化比自然条件下要快的多。说明选择合理技术措施,对农业持续发展具有十分重要的意义。施肥和耕作是影响土壤肥力变化的 2 个重要因素,其中施肥是加速红壤母质熟化主要途径和方法。

土壤肥力长期定位监测试验,具有时间上反复证明,信息量极为丰富,数据准确可靠,解释能力强,在生产上可提供决策性建议等优点,笔者通过长期定位试验研究,四纪红土和花岗岩红壤施用化肥 25 年后导致土壤不断酸化,pH 随之逐渐降低,作物产量极低甚至绝收。这说明要提高作物产量,改善品质、培肥地力,必须减少化肥用量,提倡有机肥无机肥配施、秸秆还田

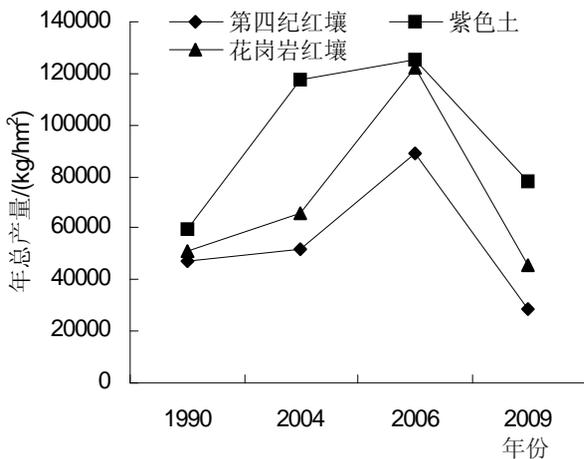


图 1 不同母质长期施肥块根作物年总产量变化



表2 紫色土不同处理对块根作物产量影响(1982—2009)

kg/hm<sup>2</sup>

年份	处理1	处理2	处理3	处理4	处理5	处理6
1990	2688.8	3626.8	6128.1	6503.3	3251.6	4002.0
2004	4252.1	5877.9	16258.1	19384.7	7503.8	11255.6
2006	4377.2	6128.1	13131.6	17258.6	9129.6	11005.5
2009	4127.1	4502.3	5627.8	6228.1	5540.3	6153.1
合计	15445.2	20135.1	41145.6	49374.7	25425.3	32416.2
平均	3861.3	5033.8	10286.4	12343.7	6356.3	8104.1

注:块根作物产量:指每种母质的红薯块根产量(鲜重);表中数据为1982—2009年红薯产量。下同。

表3 四纪红土不同处理对块根作物产量影响(1982—2009)

kg/hm<sup>2</sup>

年份	处理1	处理2	处理3	处理4	处理5	处理6
1990	988.0	1438.2	4127.1	4752.4	3501.8	3751.9
2004	3626.8	4877.4	5377.7	4502.3	6753.4	6878.4
2006	6503.3	4752.4	8629.3	9254.6	6003.0	8754.4
2009	1363.2	3014.0	1325.7	2413.7	1951.0	2876.4
合计	12481.3	14082.0	19459.8	20923.0	18209.2	22261.1
平均	3120.3	3520.5	4865.0	5230.8	4552.3	5565.3

表4 花岗岩红壤不同处理对块根作物产量影响(1982—2009)

kg/hm<sup>2</sup>

年份	处理1	处理2	处理3	处理4	处理5	处理6
1990	2188.6	2276.1	3626.8	4127.1	2126.1	2376.2
2004	3876.9	7003.5	6378.2	8629.3	7253.6	11005.5
2006	5377.7	8254.1	11755.9	9879.9	12381.2	13756.9
2009	4965.0	5040.0	2501.3	2626.3	4389.7	4489.7
合计	16408.2	22573.7	24262.2	25262.6	26150.6	31628.3
平均	4102.1	5643.4	6065.6	6315.7	6537.7	7907.1

还土、恢复绿肥生产。要加速生土熟化,必须采取作物秸秆还土和土壤施用有机物。

长期定位施肥监测试验是一个历史悠久的巨大的信息库,隐藏着无穷的科学真谛有待去开发和认识。还应该考虑到长期向土壤施用有机肥肥料或者是化肥,均会对生态环境带来一定的负面影响。因此,如何合理施肥或者减少施肥既能保证地力,又能减少对人类社会生存环境的影响,是今后进一步研究的课题。

### 参考文献

- [1] 中国农业科学院红壤实验站.红壤丘陵区农业发展研究[M].北京:中国农业科技出版社,1995:25-29.
- [2] 谢英荷.新修梯田生土培肥熟化生物调控途径的研究[A].中国青年农业科学学术年报[C].北京:中国农业出版社,1999.
- [3] 谢英荷,洪坚平,周淑琴,等.黄土丘陵区新造田培肥熟化高产技术措施的探讨[J].水土保持学报,2001,15(4):126-128.
- [4] 马承华.生土熟化试验报告[J].陕西农业科学,1979(12):19-21.
- [5] 李鸿恩.“生土”的农业生产特性及培肥措施[J].土壤肥料,1990(4):5-8.
- [6] 周鑫斌,段学军.不同土壤熟化措施对土壤微生物量碳的影响[J].山西农业科学,2003,31(2):33-36.
- [7] 杨珍平,白志明,张翔宇,等.黄土母质生土当年施肥对谷类作物生产力与根际土壤营养及生物活性的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(4):698-705.
- [8] 王建娥.用湿润灌溉、配方施肥法快速改良熟化生土地[J].山西农业科学,2007,35(4):59-60.
- [9] 尚治安,李昱,杜治国,等.湿润灌溉加速生土熟化研究[J].水土保持学报,2001,15(6):132-135.
- [10] 朝阳农学院.腐殖酸类肥料在生土当年熟化措施中的改土效应[J].土壤,1976(4):189-193.
- [11] 金志南,吕能慧,冯金生,等.种草在复垦种植系统工程中的效益[J].山西农业大学学报,1990,10(2):143-146.
- [12] 曾希柏,李菊梅,徐明岗,等.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,2006,37(3):434-437.

(下转第53页)



随基质比重增加而生长加快,但在轻基质中掺和适当比例的食用菌渣或园土,不仅能够降低基质成本,对改善幼苗素质也有一定作用。试验也发现,“发发得”商品基质吸水性差,难以浇透水,其速效钾含量也明显比其他基质低,不适合于西兰花穴盘育苗,这与在结球生菜中的试验结果存在差异<sup>[3]</sup>。

(3)本试验的育苗时间选择在10月下旬,而生产上在9月,甚至8月就开始育苗,此时温度较高,对于出苗及幼苗生长速率等的影响都存在着差异,本试验结论是否适用于8—9月的西兰花穴盘育苗还需要进一步验证。

### 参考文献

[1] 陈杰,戴丹丽,寿伟林,等.不同穴盘规格对青菜幼苗生长发育的影响[J].浙江农业学报,2004,16(1):7-11.

[2] 崔秀敏,王秀峰.黄瓜穴盘育苗基质特性及育苗效果的研究[J].山东农业大学学报:自然科学版,2001,32(2):124-128.

[3] 崔秀敏,王秀峰,魏珉.几种复合育苗基质特性及其在生菜上的育苗效果[J].中国蔬菜,2002(3):17-19.

[4] 樊绍翥,张立微,李晓梅,等.不同肥料配方对穴盘茄子育苗的影响[J].北方园艺,2007(3):42-43.

[5] 韩素芹,王秀峰,魏珉,等.甜椒穴盘苗壮苗指数及其与苗期性状的相关性研究[J].山东农业大学学报:自然科学版,2004,35(2):

187-190,195.

[6] 韩素芹,王秀峰.氮磷对甜椒穴盘苗壮苗指数的影响[J].西北农业学报,2004,13(2):128-132.

[7] 杨暹,陈玉娣,李德明.育苗容器大小对西兰花幼苗生长及产量的影响[J].广东农业科学,2000(3):19-21.

[8] 戴忠良,潘耀平,秦文斌,等.西兰花穴盘育苗营养面积与苗龄对秧苗素质及产量的影响[J].中国蔬菜,2001(6):34-35.

[9] 叶国平,沈敏东,杨忠星,等.不同基质配方对蔬菜穴盘育苗效应[J].上海蔬菜,2006(4):82.

[10] 黄益鸿.青花菜不同育苗方式对产量影响的研究[J].湖南农业科学,2003(3):26-27.

[11] 刘飞,陈春秋,周克全.春西兰花穴盘规模化栽培技术[J].北方园艺,2005(1):22-23.

[12] 朱晶华,韩明,沙斌,等.夏秋季西兰花穴盘育苗技术[J].上海蔬菜,2007(5):21.

[13] 何道根,刘伟明,何晓彪,西兰花穴盘育苗技术研究[J].中国农学通报,2010,26(2):171-177.

[14] 唐启义.实用统计分析及其DPS数据处理系统[M].北京:科学出版社,2002.

[15] 陆国军,俞刚翔.不同穴盘类型和基质配方对甘蓝育苗的影响[J].长江蔬菜,2007(7):54-55.

[16] 李传勇,黄聪丽,杨强,等.花椰菜穴盘育苗技术研究.中国蔬菜[J],2004(6):28-29.

[17] 梁伟玲,暴建枝.樱桃番茄穴盘育苗在不同穴盘及基质下的影响[J].吉林蔬菜,2006(3):54-55.

(上接第34页)

[13] 李东升,周为华,范佳,等.秸秆还田对土壤特性和作物生产的影响[J].安徽农学通报,2010,16(15):158-161.

[14] 高菊生.湘南三种典型红壤生土长期施肥对十字花科作物产量影响[J].中国农学通报,2009,25(15):235-239.

[15] 高菊生.种典型红壤生土长期施肥对禾本科作物产量影响[J].耕作与栽培,2008(4):18-19,49.

[16] 高菊生,孙楠,秦道珠,等.湘南3种典型红壤生土长期不同施肥对豆科作物的影响[J].湖南农业科学,2008(1):55-57.

[17] 高菊生,孙楠,徐明岗,等.湘南三种典型红壤生土长期施肥对豆科作物产量的影响[J].耕作与栽培,2007(6):6-8,37.

[18] 高菊生,徐明岗,孙楠,等.湘南三种典型红壤生土长期施肥对作物产量的影响[J].中国农学通报,2007,23(10):209-215.

[19] 沈富林,秦道珠,刘更另.湘南红壤区3种土壤水热状况的研究[J].中国农业科学,1992,25(1):1-9.

[20] 谢开云,董慕新,刘更另.红壤丘陵区三种土壤生土熟化初期的养分和pH变化特征[J].中国农业科学,1994,27(6):33-40.

[21] 于寒青,孙楠,吕家珑,等.红壤地区三种母质土壤熟化过程中有机质的变化特征[J].植物营养与肥料学报,2010,16(1):92-98.

[22] 王伯仁,徐明岗,申华平,等.红壤母质熟化过程中土壤磷的组分变

化研究[J].湖南农业科学,2005(1):42-44.

[23] 于寒青,徐明岗,吕家珑,等.长期施肥下红壤地区土壤熟化肥力评价[J].应用生态学报,2010,21(7):1772-1778.

[24] 高菊生,曹卫东,董春华,等.长期种植绿肥28年对水稻产量和土壤肥力影响[J].中国水稻科学,2010,24(6):672-675.

[25] 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,2000.

[26] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978.

[27] 湖南省农业厅.湖南土壤[M].北京:中国农业出版社,1989:5-7.

**致谢:**该长期试验由刘更另院士设计并一直在刘更另院士、陈福兴研究员、徐明岗研究员指导下进行。参加研究的还有秦道珠、曾希柏、谢开云、沈富林、陈铭、秦瑞君等同志。在研究过程中得到了黄鸿翔研究员、杨金华女士的大力支持。在此一并致谢。