

# 红壤坡耕地耕层土壤质量特征及障碍因素研究

刘志鹏, 史东梅\*, 金慧芳, 娄义宝, 林姿, 杨旭

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

**摘要:** 为探究红壤坡耕地耕层质量特征及其障碍因素, 通过野外调查、资料查阅及室内土壤理化性质分析等综合性研究手段, 对江西红壤坡耕地耕层土壤质量统计特征、演变特征及主要障碍因素进行分析。结果表明: (1) 红壤坡耕地田面坡度主要分布在 2~16° 之间, 耕层平均厚度 13.40 cm, 有效土层厚度平均 88.30 cm, 土壤容重平均为 1.17 g/cm<sup>3</sup>; 耕层土壤有机质平均含量 19.37 g/kg, 土壤 pH 值平均 5.36。(2) 红壤坡耕地耕层质量近 20 年有明显提高, 田面坡度从 6° 降至 4°, 耕层厚度从 13.68 cm 增至 16.42 cm; 耕层土壤有机质含量 24.63 g/kg, 提高 33.93%, 全氮、有效磷和速效钾含量分别增加 10.53%、230.98%、44.18%。(3) 红壤坡耕地低产耕层土壤质量的主要障碍因素是土壤养分贫瘠化、粘重化和酸化; 花生和木薯低产耕层的土壤容重和粘粒含量均大于高产耕层, 而土壤孔隙度、田间持水量、有机质含量及 pH 值均小于高产耕层, 表明高产坡耕地耕层土壤质量优于低产坡耕地。研究结果可为江西红壤坡耕地耕层质量改善和合理耕层构建提供科学参考。

**关键词:** 坡耕地; 耕层; 土壤质量; 障碍因素; 红壤

**中图分类号:** S151.9; S155.2\*5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6257 (2018) 03-0007-08

红壤坡耕地是江西省经济作物及粮食作物的重要基地, 然而在长期利用过程中, 由于严重的“春蚀秋旱”, 加上人为不合理的耕作和施肥, 红壤坡耕地已出现整体地力衰退、水土流失、水旱灾害频繁发生等现象, 加剧了土壤障碍的形成, 导致坡耕地作物产量不断下降<sup>[1]</sup>。土壤质量是土壤在生态系统边界范围内维持作物生产能力, 保持环境质量及促进动植物健康的能力, 是农业生态系统众多组成因子之一<sup>[2]</sup>。土壤耕层是农业生产的重要物质条件, 改善耕层土壤质量则有利于构建耕地合理耕层和促进作物生长<sup>[3]</sup>。因此, 研究坡耕地耕层土壤质量及其障碍因素, 对加强坡耕地耕层土壤有效管理, 提高坡耕地生产力具有重要的指导意义。近年来, 国内外学者采取不同方法对土壤质量特征及其障碍因素进行研究。Cambardella 等<sup>[4]</sup>利用地形分析方法和土壤管理评价框架 (SMAF) 比较了耕地传统耕作和垄沟耕作的土壤质量特征。Maddoni 等<sup>[5]</sup>在小区尺度上利用多元统计方法对南美草原的土壤

质量特征进行了研究。苏晓燕等<sup>[6]</sup>运用统计学方法研究了华南地区不同土壤利用条件下土壤质量演变特征和土壤障碍因素的发育特点。王琪琪等<sup>[7]</sup>采用土壤质量综合指数法和障碍因素诊断模型研究了沿海滩涂围垦区土壤质量演变特征。杨奇勇等<sup>[8]</sup>将 GIS 技术和障碍因素诊断模型结合定量分析研究了耕地土壤养分贫瘠化及其障碍因素。目前, 国内学者多选用耕层土壤养分指标作为土壤质量和障碍因素的研究指标, 较少使用土壤物理性状指标, 而土壤物理性状在土壤质量的组成中具有重要作用, 是土壤结构和水动力学性能的定量化表征, 对土壤侵蚀、作物产量和土壤管理都产生了重要的影响<sup>[9-10]</sup>。本文采用野外实地调查、室内资料收集及实验分析等综合性研究手段, 选取与作物生产密切相关的耕层土壤养分指标和物理性状指标, 采用已修正后的内梅罗公式和主成分分析法, 探讨红壤坡耕地耕层土壤质量特征和主要障碍因素, 以期对江西红壤坡耕地耕层质量提高和合理耕层构建提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

江西省位于长江中下游南岸, 地理位置为 24°29'14"~30°04'41"N、113°34'36"~118°28'58"E,

收稿日期: 2017-08-06; 最后修订日期: 2017-11-05

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项“坡耕地合理耕层评价指标体系建立 (201503119-01-01)”。

作者简介: 刘志鹏 (1991-), 男, 陕西汉中, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与流域治理。E-mail: 15086643684@163.com。

通讯作者: 史东梅, E-mail: shidm\_1970@126.com。

属于亚热带季风气候区,年平均气温为 16.2 ~ 19.7 °C,年平均降水量为 1 398.0 ~ 1 951.0 mm,年均日照时间为 1 473 ~ 2 078 h,无霜期约为 241 ~ 305 d。全省以山地、丘陵为主,水田多,旱地少,旱地主要有红壤型旱地和沙河型旱地,红壤旱地主要分布在坡度为 3 ~ 8°的缓坡地,以种植薯类和豆类为主;沙河旱地则主要分布在鄱阳湖周边,以种植蔬菜、水果、花生等为主<sup>[1,11]</sup>。土壤类型多样,以第四纪红壤分布最广,土壤质地粘重,透水性差,保水保肥性较差,土壤肥力退化严重<sup>[12]</sup>。

### 1.2 资料收集与整理

本文以全国第二次土壤普查、《江西土壤》、《江西红壤》、《江西土种》和《江西省余江县耕地地力评价技术报告》为调查的主要数据来源,并结合 CNKI 查找近年公开发表的有关江西坡耕地耕层土壤质量的文献。根据江西省红壤坡耕地典型种植模式和坡耕地分布区域,分别选取 1982 年江西省红壤坡耕地 50 个剖面样本和 2003 年江西省红壤坡耕地 38 个剖面样本,并从全国第二次土壤普查中筛选出 38 个相应的剖面样本与 2003 年进行对比分析。提取的统计指标分别为坡耕地田面坡度、耕层厚度、有效土层厚度、土壤容重、有机质、全氮、有效磷、速效钾和 pH 值等。

### 1.3 土样采集与分析

2015 年 7 月 20 ~ 30 日对江西进贤、余江、南丰和兴国的红壤坡耕地进行野外调查,参照 1982 年与 2003 年江西省红壤坡耕地野外调查的采样点分布情况,在不同区域选择具有典型种植模式的红壤坡耕地为剖面采样点,共采集 12 个剖面样点。样地种植作物主要为花生和木薯,种植方式为轮作,根据近年来江西省红壤旱地花生和木薯平均产量情况<sup>[13-14]</sup>,将坡耕地耕层划分为高产耕层和低产耕层,其中花生高产耕层和低产耕层的产量水平分别为 3 000 kg/hm<sup>2</sup> 以上、2 250 kg/hm<sup>2</sup> 以下,木薯高产耕层和低产耕层的产量水平分别为 37 500

kg/hm<sup>2</sup> 以上、30 000 kg/hm<sup>2</sup> 以下。采用 100 cm<sup>3</sup> 环刀以 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm 对样地进行分层采样,用于土壤容重、孔隙度、田间持水量的测定;同时,每层采集 3 kg 左右的散样带回室内风干,用于土壤机械组成和养分的测定。

室内土壤基本理化性质测定方法<sup>[15]</sup>:土壤容重、孔隙度、田间持水量测定采用环刀法,土壤机械组成测定采用吸管法,电位法测定土壤 pH 值,重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机质,半微量凯式定氮法测定土壤全氮,NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定土壤全磷,NaOH 熔融-火焰光度法测定土壤全钾,Olsen 法测定土壤有效磷,1 mol/L NH<sub>4</sub>OAc 提取-火焰光度法测定土壤速效钾。

### 1.4 土壤综合质量评价

本文采用已修正过内梅罗公式综合质量指数对其评价,具体方法如下<sup>[16-17]</sup>:

$$Q_1 = 0.5 \times [2P_{iave}^2 + 2P_{imin}^2] / 2 \times [(n-1)/n] \quad (1)$$

式中  $Q_1$  为土壤质量指数,  $P_{iave}$  为样品中土壤质量单指标指数的均值,  $P_{imin}$  为样品中单指标指数的最小值,  $n$  为样品中评价指标的个数。

根据 1982 年中国土壤质量普查的分级标准<sup>[18]</sup>,把第 5 级别的下、上限分别定为  $X_{min}$ 、 $X_{mid}$ ,第 3 级别的下限定为  $X_{max}$ ,各指标的界限值如表 1。测定的因子属于“极差”级别时,即  $X_i < X_{min}$ ,  $P_i = X_i / X_{min}$  ( $P_i < 1$ );测定的因子属于“差”级别时,即  $X_{min} \leq X_i < X_{mid}$ ,  $P_i = 1 + (X_i - X_{min}) / (X_{mid} - X_{min})$  ( $1 \leq P_i < 2$ );测定的因子属于“中等”级别时,即  $X_{mid} \leq X_i < X_{max}$ ,  $P_i = 2 + (X_i - X_{mid}) / (X_{max} - X_{mid})$  ( $2 \leq P_i < 3$ );测定的因子属于“良好”级别时,即  $P_i \geq X_{max}$ ,  $P_i = 3$ ;式中  $P_i$  为单质量指标指数,  $X_i$  为某指标的测定值,  $i$  为各测定的指标。

采用 SPSS 的 K - Means Cluster 对 1982 年和 2003 年的土壤质量指数进行分类定级,分级如表 2 所示<sup>[16]</sup>。

表 1 土壤质量单指标分级标准

	田面坡度 (°)	耕层厚度 (cm)	土壤容重 (g/cm <sup>3</sup> )	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	pH 值
$X_{min}$	2	10	1.25	6	0.5	3	30	4.5
$X_{mid}$	6	20	1.35	10	0.75	5	50	5.5
$X_{max}$	15	30	1.45	20	1	10	100	6.5

表2 土壤质量等级划分标准

质量等级	1	2	3	4
质量评语	优	良	中	低
质量指数范围	1.93 ~ 2.13	1.35 ~ 1.76	1.11 ~ 1.31	0.81 ~ 1.05

### 1.5 数据处理

采用统计软件 Excel 2010 和 SPSS 19.0 进行描述性统计、方差分析和主成分分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡耕地耕层土壤质量指标统计分析

土壤质量是与土壤的各种形成因素以及土壤耕作的动态变化相关的一种固有的土壤属性,土壤质量和人类活动关系密切,合理的利用方式和施肥结构,有利于土壤质量提高<sup>[19]</sup>。对江西省 50 个红壤坡耕地土壤剖面样本的土壤质量指标进行统计分析可知(表3),在耕层剖面性状方面,红壤坡耕地田面坡度分布在 2 ~ 16°之间,平均坡度为 5°,有效

土层厚度平均 88.30 cm,耕层厚度平均为 13.40 cm,比全国平均耕层厚度 16.50 cm 低 3.10 cm<sup>[20]</sup>,表明红壤坡耕地耕层较浅薄。土壤容重低于 1.40 g/cm<sup>3</sup>,平均值为 1.17 g/cm<sup>3</sup>,表明红壤坡耕地耕层较疏松,适宜耕作。在耕层养分方面,土壤有机质平均含量 19.37 g/kg,全氮、有效磷和速效钾平均含量分别为 1.25 g/kg、7.34 mg/kg、113.80 mg/kg,土壤 pH 值平均 5.36,偏酸性。根据我国南方丘陵区红壤肥力状况评价标准<sup>[21]</sup>,江西省红壤坡耕地耕层土壤有机质、全氮和速效钾含量均属于轻度缺乏水平,整体上红壤坡耕地耕层土壤肥力处于中下水平。变异系数的大小体现土壤质量的离散程度,由表3可以看出,土壤有效磷、全氮、有机质和土壤容重的变异系数分别为 94.61%、86.95%、63.33%和 74.63%,变异性处于偏上水平,表明土壤有效磷、全氮、有机质和土壤容重大小在江西红壤坡耕地分布很不均衡,这主要是由于长期施肥和耕作的区域性差异所导致。

表3 坡耕地耕层土壤质量指标统计特征值

特征指标	样本数	最大值	最小值	平均值	标准差	偏度	峰度	变异系数 (%)
田面坡度 (°)	50	16	2	5	4.26	1.15	0.09	74.05
有效土层厚度 (cm)	50	140.00	60.00	88.30	19.31	0.01	-0.74	21.87
耕层厚度 (cm)	50	21.00	4.00	13.40	4.17	-0.55	-0.09	31.10
田间持水量 (%)	50	42.31	15.40	30.56	6.80	-0.55	-0.09	22.24
土壤容重 (g/cm <sup>3</sup> )	50	1.40	1.00	1.17	0.09	0.78	0.16	74.63
有机质 (g/kg)	50	55.90	3.40	19.37	12.27	1.36	1.79	63.33
全氮 (g/kg)	50	8.30	0.52	1.25	1.09	0.68	0.14	86.95
有效磷 (mg/kg)	50	37.20	1.20	7.34	6.94	-1.26	1.59	94.61
速效钾 (mg/kg)	50	277.00	48.00	113.80	43.82	1.29	3.21	38.15
pH 值	50	8.20	4.30	5.36	0.79	1.88	4.17	14.80

### 2.2 坡耕地耕层土壤质量演变特征

土壤质量变化是衡量土壤生产力大小和土壤环境质量优劣的度量<sup>[22]</sup>。由表4可知,与第二次土壤普查结果相比,2003年江西红壤坡耕地耕层土壤质量变化明显。红壤坡耕地田面坡度为 4°,降低 33.33%,耕层平均厚度为 16.42 cm,增加 2.74 cm,土壤容重平均值为 1.22 g/cm<sup>3</sup>,提高 3.39%。红壤坡耕地耕层厚度和土壤容重的增加与江西省农业机械化水平的提高有关,长期的机械压实和深翻导致土壤容重和耕层厚度增加。红壤坡耕地耕层养分含量明显增加,有机质平均含量为 24.63 g/kg,增加 33.93%,全氮、有效磷和速效钾平均含量分

别为 1.47 g/kg、25.32 mg/kg 和 166.41 mg/kg,分别增加 10.53%、230.98%、44.18%。土壤 pH 值平均值为 5.17,降低了 4.18%,表明土壤酸性增强。酸化的原因除与酸雨有关外,与长期施用酸性和生理酸性肥料也有较大关系。江西红壤坡耕地耕层养分含量提高与长期施肥有关,近些年大量施用化肥导致土壤中氮、磷、钾元素含量提高,也使作物产量大幅度提高,以及作物归还土壤的根茬量较大,从而导致土壤有机质含量增大<sup>[23]</sup>。整体上,与第二次土壤普查相比,2003年江西省红壤坡耕地耕层厚度和土壤养分含量有明显增大,表明红壤坡耕地土壤肥力水平有所提高。

表4 坡耕地耕层土壤质量演变特征

特征指标	最大值		最小值		均值		标准差		增减率 (%)
	1982年	2003年	1982年	2003年	1982年	2003年	1982年	2003年	
田面坡度 (°)	16	12	2	2	6	4	4.51	2.69	-33.33
耕层厚度 (cm)	21.00	22.50	4.00	5.00	13.68	16.42	4.60	3.42	20.03
土壤容重 (g/cm <sup>3</sup> )	1.40	1.34	1.10	1.12	1.18	1.22	0.09	0.15	3.39
有机质 (g/kg)	55.90	39.97	3.40	7.16	18.39	24.63	12.45	7.17	33.93
全氮 (g/kg)	8.30	2.53	0.52	0.51	1.33	1.47	1.23	0.48	10.53
有效磷 (mg/kg)	37.20	30.80	1.20	5.36	7.65	25.32	7.26	52.60	230.98
速效钾 (mg/kg)	277.00	382.46	56.00	69.99	115.42	166.41	42.93	87.53	44.18
pH值	6.20	5.81	4.30	4.58	5.42	5.17	0.86	0.53	-4.18

对土壤单项指标指数和综合质量指数进行计算 (表5), 与第二次土壤普查结果相比, 2003年红壤坡耕地耕层土壤的单指标指数变化较大。除田面坡度和土壤 pH 值外, 2003年红壤坡耕地耕层厚度、土壤容重、有机质、全氮、有效磷和速效钾指数均有不同幅度的提高。田面坡度降低 21.02%, 质量指数均为“差”级别; 耕层厚度增加了 45.98%, 质量指数由“差”的级别变为“中等”级别; 土壤容重增加了 7.39%, 质量指

数均为“差”级别; 有机质提高了 23.74%, 质量指数由“差”级别变为“中等”级别; 全氮、有效磷和速效钾指数分别提高了 25.37%、26.49% 和 4.46%。土壤 pH 值指数减少了 1.14%, 质量指数均为“差”级别。1982年土壤综合质量指数为 1.69, 2003年土壤综合质量指数为 1.93, 上升 14.20%。根据土壤质量等级划分标准, 红壤坡耕地耕层土壤质量等级由良变为优, 表明红壤坡耕地耕层土壤质量明显提高。

表5 坡耕地耕层土壤单项指标指数和综合质量指数演变特征

	田面坡度	耕层厚度	土壤容重	有机质	全氮	有效磷	速效钾	pH值	综合质量
1982年	1.76	1.37	1.76	1.98	2.01	1.85	2.69	1.76	1.69
2003年	1.39	2.00	1.89	2.45	2.52	2.71	2.81	1.74	1.93
变化量	-0.37	0.63	0.13	0.47	0.51	0.86	0.12	-0.02	0.24

### 2.3 坡耕地耕层土壤质量障碍因素分析

土壤物理性状特征是反映土壤基本性状和结构的指标, 土壤物理性质的好坏源于土壤结构, 并最终影响到土壤物理质量<sup>[24]</sup>。由表6可知, 2015年不同坡耕地耕层土壤物理性状差异显著, 与 20~40 和 40~60 cm 土层相比, 花生和木薯红壤坡耕地 0~20 cm 土层的土壤容重较小, 毛管孔隙度和田间持水量较大, 根系分布较多。这主要是由于 0~20 cm 土层属于耕作活动和作物根系主要分布区域, 长期的翻耕导致该耕层土壤结构较好。与 1982年和 2003年相比, 2015年坡耕地耕层土壤平均容重分别提高 12.71%、9.02%, 表明坡耕地耕层土壤紧实程度增加, 这主要与近些年江西省农业机械化水平的提高有关。在相同土层花生和木薯低产坡耕

地的土壤容重大于高产坡耕地, 而低产坡耕地的毛管孔隙度和田间持水量均小于高产坡耕地。花生和木薯坡耕地耕层土壤 <0.01 mm 的粉粒含量均大于 50.00%, 并且同一土层 <0.01 mm 粉粒含量和 <0.001 mm 粘粒含量均表现为低产坡耕地 > 高产坡耕地, 表明花生和木薯低产坡耕地耕层土壤质地较粘重。而相关研究表明, 红壤粘重化是造成坡耕地作物低产的一个重要因素<sup>[25]</sup>。通过对比高产和低产耕层土壤物理性状和结构特征可知, 高产坡耕地具有土壤容重较小、持水能力较好、粘粒含量较少和疏松多孔的良好耕层结构, 而合理的耕层结构可以促进作物根系伸展和生长发育, 为作物的高产提供基础<sup>[3]</sup>。说明合理的耕层结构是低产坡耕地耕层改造为高产坡耕地耕层的基础。

表 6 坡耕地耕层土壤物理性状及结构特征

耕层类型	土层 (cm)	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	毛管孔隙度 (%)	田间持水量 (%)	<0.01 mm 粉粒含量 (%)	<0.001 mm 粘粒含量 (%)	结构特征
花生 低产耕层	0~20	1.33 ± 0.31cB	43.38 ± 6.23aA	32.46 ± 1.46bD	66.20 ± 5.44cC	23.20 ± 1.80eD	团粒状结构, 上紧下松, 较多孔隙和根系。
	20~40	1.42 ± 0.12aC	38.93 ± 3.35cB	29.27 ± 5.01cA	58.40 ± 8.21aA	20.00 ± 3.52cE	团块状结构, 较紧实, 相当于犁底层。
	40~60	1.46 ± 0.23dC	36.87 ± 9.68bC	25.12 ± 3.18aB	63.80 ± 8.68dB	19.20 ± 2.34bC	块状结构, 紧实, 较少孔隙。
花生 高产耕层	0~20	1.28 ± 0.14dA	44.41 ± 5.44aD	34.11 ± 2.89cC	52.60 ± 2.57dD	4.40 ± 1.06fB	粒状结构, 十分疏松, 大量孔隙和根系。
	20~40	1.30 ± 0.09bA	39.82 ± 3.27cB	31.03 ± 1.17aE	56.80 ± 5.80bB	4.20 ± 2.25aB	团粒状结构, 较紧实, 少量根系。
	40~60	1.45 ± 0.13dD	37.87 ± 4.16bC	26.12 ± 3.72bB	53.80 ± 7.33eA	5.80 ± 0.94dC	块状结构, 紧实, 较少孔隙, 无根系。
木薯 低产耕层	0~20	1.34 ± 0.03cC	40.57 ± 6.56bE	32.05 ± 2.89bD	57.80 ± 4.50eB	17.60 ± 2.08bA	团状结构, 较疏松, 较多孔隙和根系。
	20~40	1.44 ± 0.24aB	38.48 ± 3.09eD	28.49 ± 2.67dC	72.00 ± 8.45cC	25.20 ± 5.49dD	粒状、块状结构, 较紧实, 无根系。
	40~60	1.57 ± 0.41eE	38.24 ± 7.45bD	27.14 ± 1.98cB	55.80 ± 6.11bE	20.60 ± 4.10eB	团块状结构, 紧实, 较少孔隙。
木薯 高产耕层	0~20	1.27 ± 0.07dA	49.07 ± 5.08cF	36.19 ± 1.90aE	56.60 ± 6.67aD	5.40 ± 0.89cF	团粒状结构, 十分疏松, 多孔隙和根系。
	20~40	1.35 ± 0.33bD	42.13 ± 8.33dC	32.84 ± 4.59eA	59.20 ± 7.59dB	4.60 ± 0.76aC	团块状结构, 较紧实, 少量孔隙和根系。
	40~60	1.41 ± 0.08dB	40.57 ± 6.97aA	29.84 ± 4.43dD	56.00 ± 9.37cD	4.40 ± 0.34cC	团粒状结构, 紧实, 较多球形小团粒。

注: 不同小写字母表示同一垂直层次不同耕层差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示同一耕层不同垂直层次差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

土壤养分指标是土壤质量的重要组成部分, 反映土壤的营养状况, 是度量土壤生长潜势的指标<sup>[24]</sup>。由表 7 可知, 2015 年不同坡耕地耕层的土壤养分等性状差异显著, 且土壤有机质和全磷含量随着土层深度增加呈现减小趋势。与 20~40 和 40~60 cm 土层相比, 花生和木薯耕地 0~20 cm 土层的土壤养分状况较好。花生和木薯坡耕地在同一土层的土壤有机质含量均表现为高产坡耕地 > 低产坡耕地, 其中在 0~20 cm 土层, 花生和木薯高产坡耕地的有机质含量分别是低产坡耕地的 1.67、

6.10 倍。由此可见, 花生和木薯高产坡耕地耕层土壤养分状况比低产坡耕地较好。相关研究表明, 土壤养分的缺失必然导致作物低产, 耕层土壤养分缺失是造成低丘红壤区花生持续低产的一个障碍因素, 尤其是有机质的缺乏, 是红壤土性不良和低产的主要矛盾<sup>[26]</sup>。与 1982 年和 2003 年相比, 2015 年坡耕地耕层土壤养分含量有所下降, 其中有机质平均含量分别下降 50.25%、62.85%, 这主要与人为不合理的施肥与耕作有关。

表 7 坡耕地耕层土壤养分等性状特征

耕层类型	土层 (cm)	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	pH 值
花生 低产耕层	0~20	6.00 ± 0.35bD	0.97 ± 0.03cC	0.42 ± 0.03aA	12.60 ± 0.93eB	6.70 ± 0.55cB	94.00 ± 9.12aC	5.3
	20~40	3.10 ± 0.48cE	0.45 ± 0.05bD	0.29 ± 0.04cB	13.00 ± 1.21bF	0.90 ± 0.04bC	75.00 ± 7.46bB	5.0
	40~60	2.71 ± 0.44aC	0.50 ± 0.04aC	0.24 ± 0.06dE	13.10 ± 2.32fF	2.20 ± 0.09aD	62.00 ± 6.90cA	5.1
花生 高产耕层	0~20	10.00 ± 0.88cA	0.98 ± 0.03cA	0.25 ± 0.09bC	9.39 ± 0.35cE	11.00 ± 0.37eE	98.00 ± 1.27bE	5.4
	20~40	7.94 ± 0.45dB	0.53 ± 0.02dB	0.20 ± 0.06dC	7.21 ± 0.63aA	3.20 ± 0.68cF	80.00 ± 4.68fD	5.4
	40~60	5.12 ± 0.76bC	0.43 ± 0.07bC	0.13 ± 0.05eD	26.50 ± 1.48eD	2.70 ± 0.99bA	65.00 ± 3.59dC	5.3
木薯 低产耕层	0~20	2.90 ± 0.18dD	0.21 ± 0.04aB	0.15 ± 0.02cB	7.22 ± 0.89dC	5.80 ± 0.15aC	44.00 ± 4.48cB	4.9
	20~40	2.53 ± 0.62aD	0.13 ± 0.06eE	0.10 ± 0.01eA	5.65 ± 0.93dD	2.40 ± 0.14dD	51.00 ± 7.49eC	4.7
	40~60	1.94 ± 0.23eC	0.17 ± 0.07cE	0.09 ± 0.01aA	6.60 ± 0.78bB	2.10 ± 0.07aD	46.00 ± 6.10bF	4.7
木薯 高产耕层	0~20	17.70 ± 1.08aE	0.99 ± 0.04cD	0.60 ± 0.04dE	10.50 ± 0.18aC	27.00 ± 1.76bC	235.00 ± 11.05dC	5.2
	20~40	10.10 ± 0.45cC	0.32 ± 0.07eB	0.25 ± 0.05dC	11.80 ± 0.02cD	3.20 ± 0.97cB	80.00 ± 6.38fD	5.1
	40~60	4.78 ± 0.60cD	0.46 ± 0.05bA	0.19 ± 0.02cD	4.45 ± 0.06dE	2.70 ± 0.06bE	64.00 ± 8.12dF	5.1

红壤酸化是土壤肥力退化和土壤环境质量下降的重要影响因素,土壤酸化加剧了养分离子的淋溶,使土壤肥力降低<sup>[21]</sup>。由表7可知,花生和木薯坡耕地耕层土壤均偏酸性,花生低产和高产耕层土壤pH值分别在5.0~5.1和5.3~5.4之间变化,木薯低产和高产耕层土壤pH值分别为4.7~4.9和5.1~5.2。同一土层低产坡耕地土壤pH值均小于高产坡耕地,说明低产坡耕地耕层土壤酸性较强。相对于20~40和40~60 cm土层,在坡耕地0~20 cm土层的pH值较大,这主要与耕作和施肥活动有关。江西省红壤坡耕地一般呈强酸反应,由于长期耕作和施肥,熟化程度不断提高,酸性程度有所降低,少数高度熟化地接近于中性<sup>[25]</sup>。

为进一步明确红壤坡耕地土壤质量的主要障碍因素,对花生和木薯低产坡耕地耕层土壤质量进行主成分分析。由表8可知,列出特征值大于1时的所有主成分,花生坡耕地耕层土壤质量第一主成分( $Y_1$ )、第二主成分( $Y_2$ )和第三主成分( $Y_3$ )的累积贡献率分别为83.923%、85.247%和68.459%,木薯低产坡耕地耕层土壤质量第一主成

分( $Y_1$ )、第二主成分( $Y_2$ )和第三主成分( $Y_3$ )的累积贡献率分别为75.340%、88.459%和58.751%。花生低产坡耕地土壤质量第一主成分( $Y_1$ )正向权系数较高的指标为土壤容重、<0.01 mm粉粒含量和<0.001 mm粘粒含量,木薯低产坡耕地土壤质量第一主成分( $Y_1$ )正向权系数较高的指标为土壤容重和<0.001 mm粘粒含量,这些都是土壤粘重化障碍的度量。土壤容重、<0.01 mm粉粒含量和<0.001 mm粘粒含量越大,说明土壤粘重化越严重。花生低产坡耕地土壤质量第二主成分( $Y_2$ )正向权系数较高的指标为土壤有机质、全氮和全磷,木薯低产坡耕地土壤质量第二主成分( $Y_2$ )正向权系数较高的指标为土壤有机质、全氮、全磷和速效钾,这些都属于土壤养分障碍的度量,有机质、全氮、全磷和速效钾含量愈低,则土壤贫瘠化就越强烈。花生和木薯低产坡耕地耕层土壤质量第三主成分( $Y_3$ )正向权系数较高的指标均为土壤pH值,是土壤酸化障碍的度量。由此可见,土壤养分贫瘠化、土壤粘重化和土壤酸化是江西省低产坡耕地土壤质量的主要障碍因素。

表8 坡耕地耕层土壤质量主成分( $Y$ )分析结果

主成分分析		花生低产坡耕地			木薯低产坡耕地		
		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
统计参数	特征值	10.910	5.678	2.090	9.793	3.206	10.456
	累积贡献率	83.923	85.247	68.459	75.340	88.459	58.751
	田面坡度	0.233	0.306	0.534	0.346	0.653	0.475
	土壤容重	0.839	0.289	0.147	0.882	0.471	0.276
	毛管孔隙度	-0.988	-0.477	-0.157	-0.973	-0.230	-0.575
	田间持水量	-0.904	-0.433	-0.427	-0.816	-0.578	-0.089
	<0.01 mm 粉粒含量	0.822	0.179	0.583	0.186	0.128	0.421
	<0.001 mm 粘粒含量	0.899	-0.047	-0.033	0.997	-0.082	0.227
	主成分权系数	有机质	0.385	1.000	0.089	0.323	0.991
全氮		0.149	0.971	0.240	0.107	0.890	0.230
全磷		0.367	0.993	-0.115	0.499	0.948	-0.189
全钾		-0.014	-0.999	0.033	-0.038	-0.683	0.456
有效磷		-0.078	0.931	0.364	0.099	0.135	-0.069
速效钾		0.411	0.279	-0.206	-0.642	0.867	0.289
pH值		-0.358	-0.241	0.934	-0.294	-0.108	0.889

### 3 结论

红壤坡耕地耕层浅薄疏松,田面坡度主要分布

在2~16°之间,耕层平均厚度13.4 cm,有效土层厚度平均88.3 cm,土壤容重平均为1.17 g/cm<sup>3</sup>;耕层土壤养分贫瘠,有机质平均含量19.37 g/kg,土壤

偏酸性, 耕层土壤有机质、全氮和速效钾含量均属于轻度缺乏水平。整体上, 江西红壤坡耕地耕层土壤肥力处于中下水平。

由于受长期耕作和施肥活动的影响, 近 20 年红壤坡耕地耕层质量变化明显, 田面坡度从 6° 降至 4°, 耕层厚度从 13.68 cm 增至 16.42 cm; 耕层土壤养分含量明显增加, 其中有机质含量 24.63 g/kg, 提高 33.93%, 土壤 pH 值为 5.17, 降低 4.18%, 说明土壤酸性增强。根据土壤质量等级划分标准, 红壤坡耕地耕层土壤质量等级由良变为优, 表明红壤坡耕地耕层土壤肥力水平提高。

红壤坡耕地高产耕层与低产耕层土壤质量差异明显, 花生和木薯低产耕层土壤容重和粘粒含量均大于高产耕层, 而花生和木薯低产耕层土壤孔隙度、田间持水量、有机质含量及 pH 值均小于高产耕层, 说明高产坡耕地耕层土壤质量优于低产坡耕地。对比分析高产和低产耕层土壤质量特征表明, 土壤养分贫瘠化、土壤粘重化和土壤酸化是江西红壤坡耕地低产耕层土壤质量的主要障碍因素。

#### 参考文献:

- [1] 赵小敏, 邵华, 石庆华, 等. 近 30 年江西省耕地土壤全氮含量时空变化特征 [J]. 土壤学报, 2015, 52 (4): 298 - 305.
- [2] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production system in Northern California [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002, 90 (1): 25 - 45.
- [3] 郑红兵, 齐华, 刘武仁, 等. 玉米农田耕层现状、存在问题及合理耕层构建探讨 [J]. 耕作与栽培, 2014, 5 (18): 39 - 42.
- [4] Cambardella C A, Moorman T B, Andrews S S, et al. Watershed - scale assessment of soil quality in the loess hills of southwest Iowa [J]. Soil and Tillage Research, 2004, 78: 237 - 247.
- [5] Maddoni G A, Urricariet S, Ghersa C M, et al. Assessing soil quality in the Rolling Pampa, using soil properties and maize characteristics [J]. Agronomy Journal, 1999, 91: 280 - 287.
- [6] 苏晓燕, 黄标, 王虹, 等. 我国华南地区不同利用条件下土壤演变对障碍因素的影响 [J]. 土壤, 2013, 45 (1): 135 - 142.
- [7] 王琪琪, 濮励杰, 朱明, 等. 沿海滩涂围垦区土壤质量演变研究—以江苏省如东县为例 [J]. 地理科学, 2016, 36 (2): 256 - 264.
- [8] 杨奇勇, 杨劲松, 姚荣江, 等. 基于 GIS 的耕地土壤养分贫瘠化评价及其障碍因素分析 [J]. 自然资源学报, 2010, 25 (8): 1375 - 1384.
- [9] Mielke L N, Wilhelm W W, Fenster C R. Soil physical characteristics of reduced tillage in a wheat - fallow system [J]. Transactions of American Society of Agricultural Engineers, 1984, 27: 1724 - 1728.
- [10] 张仁陟, 罗珠珠, 蔡立群, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤物理质量的影响 [J]. 草业学报, 2011, 20 (4): 1 - 10.
- [11] 张方方, 齐述华, 舒晓波, 等. 南方山地丘陵土地利用类型的地形影响 GIS 分析—以江西省为例 [J]. 地球信息科学学报, 2010, 12 (6): 784 - 790.
- [12] 马良, 姜广辉, 左长清, 等. 江西省 50 余年来降雨侵蚀力变化的时空分布特征 [J]. 农业工程学报, 2009, 25 (10): 61 - 68.
- [13] 徐小林, 黄欠如, 叶川, 等. 丘陵红壤旱地花生木薯间作适宜间距研究 [J]. 江西农业学报, 2012, 24 (4): 20 - 22.
- [14] 林洪鑫, 袁展汽, 刘仁根, 等. 江西红壤旱地木薯农艺性状与产量的关系初步研究 [J]. 中国农学通报, 2011, 27 (27): 204 - 208.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [16] 王改改, 傅瓦利, 袁红, 等. 万州区土壤质量变化评价及其可持续利用对策 [J]. 西南农业大学学报, 2006, 28 (2): 236 - 240.
- [17] 韩平, 王纪华, 潘立刚, 等. 北京郊区田块尺度土壤质量评价 [J]. 农业工程学报, 2009, 25 (增刊2): 228 - 234.
- [18] 全国土壤普查办公室. 中国土壤 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [19] Filip Z. International approach to assessing soil quality by ecologically - related biological parameters [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2002, 88: 169 - 174.
- [20] 白伟, 孙占祥, 郑家明, 等. 辽西地区土壤耕层及养分状况调查分析 [J]. 土壤, 2011, 43 (5): 714 - 719.
- [21] 何园球, 孙波. 红壤质量演变与调控 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [22] 王金满, 杨睿璇, 白中科. 草原区露天煤矿排土场复垦土壤质量演替规律与模型 [J]. 农业工程学报, 2012, 28 (14): 229 - 235.
- [23] 涂起红, 朱安繁, 张龙华, 等. 江西省耕地地力演变趋势研究 [J]. 江西农业学报, 2016, 28 (2): 17 - 21.
- [24] 郑海金, 杨洁, 黄鹏飞, 等. 覆盖和草篱对红壤坡耕地花生生长和土壤特性的影响 [J]. 农业机械学报, 2016, 47 (4): 119 - 126.
- [25] 赵其国, 谢为民, 贺湘逸, 等. 江西红壤 [M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1988.
- [26] 王明珠, 陈学南. 低丘红壤区花生持续高产的障碍及对策 [J]. 花生学报, 2005, 34 (2): 17 - 22.

[下转第 41 页]

- [J]. 烟草科技, 2003, (4): 29-32.
- [18] 徐盈. 重庆烤烟前期生长调控的关键技术研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [19] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策 [J]. 土壤与环境, 2000, 9 (1): 1-6.
- [20] 陈萍, 李天福, 张晓海, 等. 利用<sup>15</sup>N 示踪技术探讨烟株对氮素肥料的吸收与分配 [J]. 云南农业大学学报, 2003, 18 (1): 1-4.
- [21] 单德鑫, 杨书海, 李淑芹, 等. <sup>15</sup>N 示踪研究烤烟对氮的吸收及分配 [J]. 中国土壤与肥料, 2007, (2): 43-45.

**Effects of modified nitrogen fertilization on nitrogen rate reduction and yield and quality of flue-cured tobacco in rainy tobacco-growing regions**

ZHANG Hai-wei<sup>1</sup>, HE Kuan-xin<sup>1</sup>, YE Wei-min<sup>2</sup>, WANG Yu-sheng<sup>2</sup>, SHAO Xue-lian<sup>3</sup>, LIU Run-sheng<sup>3</sup>, WANG Nian-lei<sup>1</sup>, JIAO Shao-he<sup>1</sup> (1. Tobacco Science Institute of Jiangxi Province, Nanchang Jiangxi 330025; 2. China Tobacco Guangdong Industrial. Co. Ltd., Guangzhou Guangdong 510385; 3. Ruijin Branch Company of Ganzhou Municipal Tobacco Company, Ruijin Jiangxi 342500)

**Abstract:** Effects of different basal-dressing application methods and ratio between base and topdressing on yield and quality of flue-cured tobacco and reducing nitrogen effect were investigated in field experiment. The results showed that under the condition of rain, digging big holes and supplying 40% base-fertilizers at bottom of holes promoted the early nutrient absorption of tobacco plant, to achieve early and quickly growth and improve central leaf quality. Opening degree, leaf area, single leaf weight and tobacco nutrition of upper leaves were improved when the ratio of top dressing increased from 50% to 65%. When the total N application rate reduced by 15% than CK (150 kg · hm<sup>-2</sup>), optimization of basal fertilization way and the ratio between base and topdressing improved the quality and output value of leaves flue-cured tobacco, and increased the economic benefit of tobacco growers.

**Key words:** rainy tobacco-growing region; fertilizer at bottom of hole; ratio between base and topdressing; flue-cured tobacco; yield and quality

[上接第 13 页]

**Soil quality and its limitation factors of slope farmland plough layer of red soil**

LIU Zhi-peng, SHI Dong-mei\*, JIN Hui-fang, LOU Yi-bao, LIN Zi, YANG Xu (College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715)

**Abstract:** In order to explore the red soil quality and its limitation factors of slope farmland plough layer in Jiangxi province, a systematic analysis of statistical characteristics, evolution and main limitation factors of red soil quality of slope farmland plough layer was made through field surveys, data inspection and laboratory analysis of soil physical and chemical properties. The results showed that the slope of red soil slope farmland was mainly located between 2 ~ 16°, the average thickness of plough layer was 13.4 cm, the average thickness of effective soil layer was 88.3 cm, the average value of soil bulk density was 1.17 g/cm<sup>3</sup>, the average value of organic matter content was 19.37 g/kg, the average value of soil pH was 5.36. The quality of plough layer in red soil slope farmland had been improved in the past 20 years, the slope of farmland had been reduced from 6° to 4°, and the thickness of plough layer had been increased from 13.68 cm to 16.42 cm, the content of organic matter was 24.63 g/kg and increased by 33.93%, the content of total nitrogen, active phosphorus and available potassium increased by 10.53%, 230.98% and 44.18% respectively. The main obstacle factors of soil quality of low yield plough layer in red soil slope farmland were the soil nutrient depletion, viscosity and acidification. The soil bulk density and clay content of the low yield plough layer of peanut and cassava were higher than that of high yield plough layer, and soil porosity, field holding water, organic matter content and pH value were lower than that of high yield plough layer. The soil quality of high yield plough layer was better than low yield plough layer in red soil slope farmland. The research results could provide a scientific reference for the improvement of red soil quality and the construction of reasonable slope farmland plough layer in Jiangxi province.

**Key words:** slope farmland; plough layer; soil quality; limitation factors; red soil