

# 我国中亚热带缓丘区红粘土红壤肥力的演化

## I. 物理学肥力的演化\*

孙波 张桃林 赵其国

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘要** 我国东南丘陵区有丰富的气候和生物资源,红壤肥力是限制其潜力发挥的重要因素。本文着重探讨中亚热带红粘土红壤物理学肥力在不同利用过程中的演化特征,然后通过数理统计分析筛选出评价指标,确定各自的权重系数,最后对土壤的物理学肥力进行了评价。结果表明:与林草地土壤相比,耕垦后表层红粘土红壤的物理学肥力在江西发生退化,表现在土壤结构遭破坏,大团聚体和微团聚体数量减少,土壤通气和毛管孔隙减少,毛管孔隙分布不均匀等方面;而在浙江则有一定程度的进化。耕地土壤的物理学肥力随着早耕熟化过程而增加,但是水旱轮作过程对其有不利的影响。园地系统中茶园土壤的物理学肥力较桔园高。

**关键词** 中亚热带,缓丘区,红粘土红壤,物理学肥力,演化

**中图分类号** S158

我国东南丘陵区土地总面积为113.3万平方公里,占全国土地总面积的11.8%。本区属热带、亚热带季风气候,水热资源丰富,以光、温、水为指标的气候生产潜力在46-54吨/公顷·年之间,但是目前大面积种植业的平均产量仅为气候生产潜力的20%左右,其中一个最重要的限制因子就是土壤肥力。而且,由于长期对土地资源的不合理利用,这一地区生态与环境遭致严重破坏,土壤肥力的退化问题极其严重。因此,研究土壤肥力演化过程,提出防止土壤肥力退化的措施,是充分发挥这一地区丰富的气候和生物资源潜力的关键。

根据全国第二次土壤普查资料,处于中亚热带的湘、赣、浙三省是红壤的主要分布区,其红壤面积达2304.9万公顷,占东南丘陵区红壤总面积的54.4%;其中分布在缓丘地区的由第四纪红粘土发育的红壤旱地面积为127.2万公顷,占本区红粘土红壤旱地总面积的28.4%,这类红壤旱地也是目前本区农业开发中潜力最大的一种土地资源。此外,湘、赣、浙三省中红粘土红壤水田面积达90.6万公顷,占了本区红粘土红壤水田总面积的47.4%。

以往的研究已就土壤肥力的各个方面进行了阐述<sup>[1-10]</sup>。其中,土壤的物理学特性影响了土壤的通气、透水、持水、导热、抗蚀和抗压等各种功能,是土壤肥力的一个重要方面。由于水稻在南方粮食生产中的重要性以及水稻土的特殊性,我国对南方红壤水稻土的物

\* 本研究为国家自然科学基金(49571043)资助项目

收稿日期:1997-08-08;收到修改稿日期:1998-03-11

理性性质研究比较多<sup>[1,4,11-14]</sup>,80年代后对红壤旱地的研究增强<sup>[6,9,15-19]</sup>,但对红壤林地和园地的研究较少。目前,在评价土壤物理学肥力演化指标的选择方面未能形成一个统一的认识。本文着重探讨红粘土红壤物理学肥力在利用过程中的演化特征,然后通过数理统计分析筛选出评价指标,确定了各自的权重系数,最后进行了综合评价。

## 1 材料与方 法

### 1.1 土壤采集区概况

在江西省鹰潭市和浙江省兰溪市选择地质、地形、植被和气候条件相似的两个红粘土红壤丘陵区。鹰潭市(27°50′—28°38′N,116°41′—117°27′E)位于江西省东部武夷山区向鄱阳湖平原的过渡地带,以农业种植业为主。金华市(28°31′—29°41′N,119°13′—120°47′E)位于浙江省中部腹地金衢盆地的东段,以工业为主,农业中农林牧副渔多种经营全面发展。

两地均属于中亚热带温暖湿润季风气候,气候温和(两地年均温为17.7℃),雨量充沛(鹰潭和金华年

表1 土壤剖面采集地点的土地利用方式和投入水平  
Table 1 Land use patterns and input level of soil sampling location

序号	土地利用方式	利用状况	每年每亩投入水平
No.	Land use pattern	Land use condition	Annual input per mu
江西省鹰潭市余江县洪湖乡			
J1	严重侵蚀地	侵蚀至网纹层,无植被覆盖	无投入
J2	40年次生针阔混交林	黎家岗村薪材林,覆盖度45%	枯枝落叶移出系统
J3	30年人工马尾松林	覆盖度30%	农民时而扒草皮
J4	荒草地	覆盖度90%	无人为破坏
J5	20年柑桔园	密度40株/亩,1991年遭受冻害 后重新种植,并间作花生	20kg尿素、50kg钙镁磷肥、 15kg KCl和200kg猪粪
J6	20年茶园	长势很差,1991年起修剪老枝条并间作花生	20kg尿素、80kg钙镁磷肥、 5kg KCl和8000kg垃圾肥
J7	30年旱地	主要种植油菜、大豆、花生和荞麦	30kg尿素、75kg钙镁磷肥、20kg KCl
J8	100年旱地	主要种植大豆、花生、黄麻和油菜	20kg尿素、50kg钙镁磷肥、15kg KCl
J9	10年水旱轮作	主要种植油菜和水稻	40kg尿素、50kg钙镁磷肥、25kg KCl
浙江省金华市兰溪市高潮乡			
Z1	严重侵蚀地	侵蚀至网纹层,无植被覆盖	无投入
Z2	8年人工针阔林	覆盖度50%	凋落物留在系统中
Z3	30年人工马尾松林	覆盖度30%,草皮很少	人为破坏很少
Z4	荒草地	覆盖度90%	无人为破坏
Z5	20年柑桔园	密度110株/亩	25kg尿素、25kg钙镁磷肥、7.5kg KCl
Z6	20年茶园	长势很好,已封垄	15kg尿素、20kg钙镁磷肥、1000kg有机肥
Z7	8年旱地	主要种植小麦、棉花、玉米和甘薯,易遭伏秋旱而抛荒	20kg尿素、40kg钙镁磷肥、10kg KCl
Z8	30年旱地	主要种植小麦、棉花、玉米和甘薯	20kg尿素、40kg钙镁磷肥、10kg KCl和 400kg有机肥
Z9	5年水旱轮作	主要种植小麦、油菜和水稻	38kg尿素、45kg钙镁磷肥、20kg KCl

降雨量分别为 1752mm 和 1365mm),但季节分配不均,主要集中在雨季(4—6月)。其植被属我国东部湿润森林区中亚热带常绿阔叶林亚带,顶级群落以甜槠、木荷为建群树种。但两地缓丘区的原始植被大多被破坏,往往代之以人工针叶林和农田植被。

在地质历史上,两地均是长期表现下沉的地段,自第四纪以来,受新构造运动的影响,产生地层的上升折曲。其后,又经受地面侵蚀作用,形成了由红土砾石层(第四纪)和红砂岩地层(白垩纪)构成的、起伏缓和的低丘陵。鹰潭和金华两地的平原面积比例相似,但鹰潭地区低丘所占比例(35.9%)较金华地区大(18%),而中低山所占比例较金华地区小。

### 1.2 样品采集地的土地利用系统及其投入水平

1994年10月在以上两个地点分别选择了9个不同的土地利用系统(表1),采集了红粘土红壤表层(0—20cm)和下层(20—40cm)的土壤混合样品。从不同土地利用系统的投入水平上看,林草地系统无投入;园耕地系统的投入水平大体上是江西余江高于浙江兰溪,其中水旱轮作系统的投入水平高于旱地系统和园地系统。虽然浙江兰溪的经济水平要高于江西余江,但是当地农业的比较效益低,农业劳动力大量流失,农业系统中的投入水平反而较江西余江的低。

### 1.3 分析方法

土壤的颗粒组成、团聚体及微团聚体组成、比重、容重等性质按常规分析方法进行测定<sup>[20]</sup>,其中容重是3个环刀样的平均值。土壤水分特征曲线用压力膜法测定,在野外取2个环刀样,测定后取其平均值,并在此基础上计算不同孔径的孔隙分布状况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤颗粒组成

第四纪红粘土发育的红壤中,粘粒部分以高岭石为主,其中铁铝氧化物含量达22.7—43.6%,而砂粒和粉砂粒分别为2.4—3.0和2.4—8.9%;土壤细粘粒部分(<0.001mm)占全土比表面的97.0%,其吸水量为0.92ml/g,而粗砂粒——细粉砂粒的吸水量为0.28—0.43ml/g<sup>[18]</sup>,因此土壤中颗粒的组成影响了其他的土壤理化性质。表2表明,红粘土发育的红壤质地均比较粘重,不同系统中土壤粘粒(<0.002mm)的含量在18.8—47.8%之间,一般是下层土壤粘粒含量略高于表层;细粉砂(0.05—0.002mm)含量在20.1—57.6%之间,粗粉砂含量较细粉砂低。江西余江与浙江兰溪两地的侵蚀地土壤颗粒组成相似,其他系统中的差异无明显规律。在江西余江100年旱地和水旱轮作地以及浙江兰溪荒草地土壤中粘粒含量较低,这可能是由于粘粒的淋溶和悬移,已有的研究表明:热带亚热带土壤中活性较强的无机结构胶结物甚至粘粒在成土过程中总是呈减少和下移的趋势<sup>[16]</sup>,旱坡地红壤中粘粒含量较母质中的低<sup>[1]</sup>,因此长期的耕垦及土壤侵蚀作用可以影响到表层土壤的颗粒组成。

### 2.2 土壤团聚体组成

2.2.1 水稳性团聚体组成 土壤中的大团聚体,特别是>1mm的大团聚体能合理调节土壤的通气与持水以及养分的释放与保持之间的矛盾,是植物良好生长的结构基础<sup>[21]</sup>,因而其含量与土壤肥力高低密切相关。表3表明,各个系统中表层土壤>1mm的各级大团聚体所占比例大多较下层高,特别是园耕地系统中更为明显,这可能与表层土壤有机质含量

表2 不同利用系统中红壤的颗粒组成(%)和比重

Table 2 Particle size distribution and specific gravity of red soil in various land use systems

序号 No.	砂粒sand (2—0.05mm)		粗粉粒coarse silt (0.05—0.02mm)		细粉粒fine silt (0.02—0.002mm)		粘粒clay (<0.002mm)		粉粘比 Silt/Clay	
	0—20cm	20—40cm	0—20cm	20—40cm	0—20cm	20—40cm	0—20cm	20—40cm	0—20cm	20—40cm
J1	14.4	—	12.6	—	30.0	—	43.0	—	0.99	—
J2	28.9	29.6	6.8	5.2	24.7	24.3	39.6	40.9	0.80	0.72
J3	22.1	19.8	11.4	13.1	24.4	21.6	42.1	45.4	0.85	0.76
J4	28.3	20.8	11.5	10.1	21.0	22.7	39.2	46.4	0.83	0.71
J5	20.8	20.9	7.5	6.5	26.0	24.8	45.7	47.8	0.73	0.65
J6	24.0	22.2	9.9	9.8	23.9	24.0	42.2	44.0	0.80	0.77
J7	24.9	24.2	26.2	27.2	4.6	2.3	44.3	46.3	0.70	0.64
J8	34.4	25.4	13.5	12.1	33.3	36.7	18.8	25.8	2.49	1.89
J9	49.0	49.1	7.0	8.5	13.1	22.1	30.9	20.3	0.65	1.51
Z1	10.6	—	11.7	—	34.0	—	43.7	—	1.05	—
Z2	24.2	23.7	7.7	9.9	24.8	24.8	43.3	41.6	0.75	0.83
Z3	15.9	12.2	14.4	14.5	35.9	37.2	33.8	36.1	1.49	1.43
Z4	36.0	26.2	19.3	17.1	23.6	31.2	21.1	25.5	2.03	1.89
Z5	13.5	11.3	7.9	9.0	49.7	48.6	28.9	31.3	1.99	1.85
Z6	15.1	11.5	11.3	8.9	41.3	44.8	32.3	34.8	1.63	1.54
Z7	15.3	17.1	10.5	9.8	38.6	38.0	35.6	35.1	1.38	1.36
Z8	13.1	12.4	9.9	9.3	44.8	44.4	32.2	33.9	1.70	1.58
Z9	17.6	14.4	11.3	13.4	34.2	35.5	36.9	36.7	1.23	1.33

较高有关。

侵蚀地表土中 $>1\text{mm}$ 的大团聚体所占比例较高,这是因为在网纹层红壤母质中无机胶结物(除粘粒外主要是无定型的铁铝氧化物)含量较为丰富。在林草地系统中,荒草地明显较高,这与其有机物含量较高、根系较密有关;马尾松人工林次之;而次生和人工针阔叶林由于枯枝落叶被移出系统而明显较低。园耕地土壤中的大团聚体比例较荒草地系统低,说明总体上耕垦作用破坏了表层土壤的大团聚体结构。其他研究也表明,非耕地红壤开垦后作旱地或水田后,有机、无机胶结物明显下降<sup>[14]</sup>,土壤中的大团聚体都有不同程度的破坏<sup>[1,4]</sup>。

各系统的土壤团聚体主要集中在 $1—0.5\text{mm}$ 和 $0.5—0.25\text{mm}$ 两级上,占了 $>0.25\text{mm}$ 部分的 $41.1—92.2\%$ (平均值为 $67.2\%$ )。而且,园耕地土壤中 $1—0.25\text{mm}$ 粒级的大团聚体的比例较林草地土壤高,另一方面 $<0.25\text{mm}$ 的微团聚体比例并未增加,这说明当 $>1\text{mm}$ 的大团聚体破坏后主要转移到 $1—0.25\text{mm}$ 粒级部分。

在园地系统中,茶园土壤的大团聚体数量明显高于桔园土壤,主要是因为茶园中凋落物数量和施肥量较高、根系比较密集。在耕地系统中,耕作年限长的旱地大团聚体比例较

表3 不同土地利用系统中红壤的团聚体组成(%)  
Table 3 Aggregate composition of red soil in various land use systems

序号 No.	团聚体组成(%) Particle size of aggregate									
	>5mm		5—1mm		1—0.5mm		0.5—0.25mm		<0.25mm	
	0—20cm	20—40cm	0—20cm	20—40cm	0—20cm	20—40cm	0—20cm	20—40cm	0—20cm	20—40cm
J1	3.5	—	19.8	—	30.8	—	18.1	—	27.9	—
J2	6.8	2.3	8.7	10.2	12.4	22.2	25.9	24.9	46.1	40.5
J3	13.1	2.0	17.3	15.5	15.8	18.1	12.2	18.1	41.6	46.3
J4	17.6	2.9	22.6	35.9	18.6	19.3	9.4	12.2	31.7	29.7
J5	5.0	1.8	14.3	12.0	21.6	20.7	22.7	20.0	36.5	45.6
J6	14.3	4.6	19.7	15.3	19.0	19.7	14.6	18.4	32.4	42.1
J7	0.2	0.4	7.4	7.1	19.2	21.2	29.9	31.5	43.4	39.7
J8	10.7	0.7	19.9	17.1	17.5	21.8	20.9	23.7	31.2	36.8
J9	6.5	0.6	14.5	13.3	30.8	33.6	20.1	24.8	28.2	27.7
Z1	13.8	—	28.9	—	18.7	—	11.7	—	27.0	—
Z2	1.8	2.1	11.1	11.3	21.4	23.5	20.6	21.3	45.0	41.9
Z3	13.3	2.7	15.9	16.4	21.4	25.8	19.2	20.7	30.2	34.4
Z4	16.7	0.4	18.5	6.8	13.1	15.9	13.0	17.5	38.8	59.4
Z5	3.1	0.4	6.8	5.0	25.0	20.1	25.7	34.7	39.3	39.8
Z6	18.1	1.7	19.2	20.9	26.3	35.0	14.4	16.1	22.1	26.3
Z7	9.1	0.0	13.6	4.2	29.5	17.9	24.8	31.7	23.1	46.2
Z8	7.5	5.8	20.4	14.3	19.8	19.5	22.2	24.3	35.0	36.1
Z9	27.7	2.2	21.0	12.8	22.2	25.9	10.5	22.4	16.7	36.6

耕作年限短的高,唐淑英等在新垦赤红壤中也有类似结果<sup>[19]</sup>;而水旱轮作系统中大团聚体的比例较30年的旱地高,说明水旱轮作对大团聚体形成的促进作用较单种水稻强,这与以前的研究结果相一致<sup>[4]</sup>。

除侵蚀地外,在上述各系统中>0.25mm的团聚体数量与粘粒含量之间的相关性不显著,而与有机质含量和H/F比之间呈显著正相关,相关系数(*r*)分别为0.499和0.518(*n* = 32, *p* < 0.01)。红壤中1—0.25mm团聚体含量与HA/FA之间也达到显著正相关(*r* = 0.361, *n* = 32, *p* < 0.05),而耕垦后红壤中大团聚体数量,特别是1—0.25mm团聚体含量大多增加,这就证明有机胶结物在耕垦熟化过程中对大团聚体形成的作用。

2.2.2 微团聚体组成 土壤中的微团聚体的含量和组成影响了土壤的养分供应及土壤酶活性,是土壤肥力的一个重要方面<sup>[6,7]</sup>。各个系统中,侵蚀地系统<0.25mm的土壤微团聚体的含量较低,而林草地系统大多较园地和耕地系统高,其中针阔叶林的含量最高(表4)。研究发现在第四纪红土红壤荒地(植被为稀疏马尾松)开垦为旱地和水田后,<0.25mm土壤微团聚体的数量增加<sup>[1,16]</sup>,而在本项研究中,只有30年旱地红壤的微团聚体含量高于马尾松林地。

已有的研究表明土壤微团聚体的组成影响着土壤养分和水分的吸持和释放<sup>[7]</sup>。在侵蚀地和林草地系统中,表层土壤微团聚体集中分布在0.02—0.25mm的范围内,占了78.6—97.1% (平均91.2%)。特别是0.02—0.05mm粒级中占了40.4—73.8% (平均55.5%),而

表4 不同土地利用系统中红壤的微团聚体组成(%)

Table 4 Microaggregate composition of red soil in various land use systems

序号	微团聚体组成(%)								结构系数(%)		保持率(%)	
	Particle size of microaggregate								Structural		Ratio of structural	
	0.25-0.05mm		0.05-0.02mm		0.02-0.002mm		<0.002mm		coefficient		maintenance	
No.	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm
J1	43.3	—	49.3	—	7.3	—	0.1	—	99.8	—	81.3	—
J2	51.8	57.0	40.4	38.0	7.7	4.9	0.1	0.1	99.8	99.8	65.3	66.0
J3	35.1	38.7	57.2	56.3	7.6	4.9	0.1	0.1	99.8	99.8	67.2	75.9
J4	40.8	38.8	49.6	57.3	9.5	3.8	0.1	0.1	99.7	99.8	51.5	66.7
J5	48.8	53.4	42.9	43.1	8.2	3.4	0.1	0.1	99.8	99.8	74.6	76.1
J6	44.8	49.5	19.2	42.8	35.9	7.6	0.1	0.1	99.8	99.8	56.8	71.9
J7	43.3	48.8	17.4	32.6	29.6	17.9	9.7	0.8	80.4	98.5	69.4	72.7
J8	36.4	33.3	17.4	15.9	40.6	41.2	5.6	0.1	73.9	99.6	40.5	61.5
J9	60.7	57.0	15.9	13.6	21.1	24.4	2.3	5.0	93.9	78.8	33.9	38.5
Z1	38.6	—	55.7	—	5.6	—	0.1	—	99.8	—	81.7	—
Z2	23.3	23.2	73.8	73.8	2.0	2.0	0.9	1.0	98.2	98.1	75.9	76.2
Z3	25.5	39.0	66.8	54.0	7.6	6.9	0.1	0.1	99.7	99.7	78.1	85.0
Z4	27.2	26.3	51.4	61.5	21.3	12.1	0.1	0.1	99.5	99.6	39.8	70.6
Z5	23.3	30.6	17.3	20.9	50.2	40.8	9.2	7.7	70.6	76.9	81.1	85.9
Z6	18.8	24.5	39.2	61.4	40.4	14.1	1.6	0.1	95.7	99.7	74.2	85.6
Z7	37.8	30.6	45.2	65.0	16.9	4.3	0.1	0.1	99.7	99.7	80.8	82.6
Z8	21.8	21.2	20.5	73.4	48.9	5.2	8.9	0.2	74.5	99.4	79.6	86.4
Z9	31.9	40.2	20.5	56.1	36.2	3.6	11.4	0.2	73.2	99.5	61.2	84.7

<0.002mm 的粒级极少(<1%)。园耕地土壤中 0.02—0.25mm 粒级所占比例较林草地土壤低,在 40.6—91.7% 之间(平均 62.3%);而 0.02—0.002mm 粒级所占比例明显提高,在 8.2—50.2% 之间(平均 32.8%);<0.002mm 的粒级所占比例也有所提高(表 4)。园耕地土壤中细粒级的微团聚体数量增加,说明耕作和施肥导致土壤养分和有机质储量库增大、调控性能增强。在江西余江低密度桔园系统中,由于施肥集中在桔树的根圈内,其表层土壤中 0.02—0.002mm 微团聚体所占比例并不高,仅与林草地土壤相当。在耕地系统中,耕作年限长的旱地中 0.02—0.002mm 微团聚体所占比例较耕作年限短的旱地高,而水旱轮作系统中的比例较 30 年旱地系统的低,后者与陈恩凤的结果不同<sup>[7]</sup>。

2.2.3 结构系数和保持率 土壤结构系数(S)反映了土壤中的结构化程度,其计算公式

为:  $S = \left(1 - \frac{a}{b}\right) \times 100\%$ , 式中  $a$ 、 $b$  分别为微团聚体分析和机械分析中<0.002mm 颗粒的

含量。侵蚀地和林草地土壤中的  $S$  值最大,且差异极小,说明土壤的结构化程度最高。江西余江的园地土壤结构系数与林草地土壤相同,而浙江兰溪的则明显较低。耕地系统中表土的结构系数总体上较林草地的表土低,其中旱地表土的结构系数随耕作年限的增加而降低,水旱轮作后,江西余江的结构系数增加,浙江兰溪的结构系数与 30 年旱地的相当

(表 4)。在江西进贤的研究表明,红粘土红壤稀疏马尾松林地开垦作旱地后,在一般的培肥条件下,结构系数随着土壤中各种胶结物含量的明显下降而减小,但辟为水田后,随着有机胶结物的更新和增加而明显增加<sup>[16]</sup>。

土壤微团聚体的保持率( $F$ )的计算公式是: $F = \frac{A-B}{A} \times 100\%$ ,式中  $A$ 、 $B$  分别为团聚

体分析和机械分析中 1—0.02mm 颗粒的含量,它比结构系数更能反映肥力的变化<sup>[11]</sup>。在侵蚀地和林草地系统中,虽然结构系数相似,但侵蚀地表层土壤的微团聚体保持率较高,而荒地则较低,这可能与前者较高的粘粒含量有关。园地系统中,桔园表层土壤的  $F$  值较茶园土壤高,而且比林草地土壤高。耕地系统中,耕作年限长的旱地表层土壤  $F$  值较低,水旱轮作后进一步降低。江西余江的耕地系统土壤  $F$  值较林地系统低。而浙江兰溪的则相当。耕地系统中的这种变化与姚贤良和于德芬研究的结果不尽相同<sup>[1]</sup>。这也说明依据团聚体数量的指标其田间差异较大,需要在可比性较好的情况下使用。

### 2.3 土壤比重,容重和孔隙度分布

2.3.1 土壤比重、容重和总孔隙度 土壤比重、容重和总孔隙度是反映土壤紧实状况的指标。从土壤比重上看(表 5),各系统之间以及土壤上下层之间的变幅在 2.63—2.73 之间,大多在 2.68 以上。不同的系统中,侵蚀地系统的比重最高,这是由于土壤网纹层粘粒含量

表5 不同土地利用系统中红壤的比重、容重和孔隙分布状况

Table 5 Specific gravity, bulk density and pore distribution of red soil in various land use systems

序号	比重		容重 ( $g/cm^3$ )		总孔隙度 (%)		通气孔隙度 (%)		毛管孔隙度 (%)		非毛管孔隙度 (%)	
	Specific gravity		Bulk density		Total porosity		Aeration porosity		Capillary porosity		Noncapillary porosity	
No.	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm
J1	2.72	—	1.53	—	43.8	—	5.1	—	16.6	—	22.1	—
J2	2.68	2.67	1.22	1.21	54.5	54.6	12.6	10.7	24.3	27.9	17.5	16.0
J3	2.69	2.70	1.31	1.28	51.2	52.6	14.9	17.6	16.5	16.1	19.8	18.9
J4	2.68	2.70	1.43	1.47	46.8	45.6	9.9	7.7	15.5	14.8	21.4	23.0
J5	2.69	2.69	1.38	1.20	48.8	55.4	5.6	7.8	22.6	23.6	20.7	24.0
J6	2.69	2.67	1.30	1.27	51.7	52.6	15.3	13.4	12.6	16.6	23.8	22.6
J7	2.68	2.68	1.40	1.34	48.0	50.0	5.0	6.7	24.6	27.2	18.4	16.1
J8	2.65	2.67	1.60	1.58	39.8	41.0	4.7	3.3	11.3	14.9	23.8	22.7
J9	2.63	2.65	1.70	1.66	37.0	39.0	1.6	1.2	14.6	16.5	20.9	21.3
Z1	2.73	—	1.54	—	43.8	—	7.5	—	6.7	—	29.5	—
Z2	2.67	2.68	1.11	1.18	58.6	55.9	20.9	15.4	23.0	28.2	14.7	12.3
Z3	2.71	2.70	1.40	1.35	48.5	50.1	15.0	17.0	11.4	10.1	22.1	23.0
Z4	2.69	2.67	1.43	1.44	46.8	46.2	10.4	15.6	14.0	12.2	22.5	18.4
Z5	2.68	2.69	1.37	1.34	48.8	50.3	16.4	16.4	17.5	19.2	14.8	14.8
Z6	2.69	2.71	1.40	1.41	48.0	48.1	18.1	14.6	10.2	13.7	19.7	19.8
Z7	2.70	2.70	1.47	1.30	45.4	51.9	11.7	16.7	11.3	11.4	22.4	23.7
Z8	2.69	2.70	1.34	1.33	50.1	50.9	15.2	15.9	14.4	12.8	20.4	22.2
Z9	2.66	2.72	1.34	1.49	49.6	45.2	4.1	3.3	24.3	15.2	21.3	26.7

较高,也可能与  $\text{SiO}_2$  含量变化有关<sup>[1]</sup>。水旱轮作系统的土壤比重最低,江西余江的 100 年旱地中土壤比重也较其它系统中的低,这是土壤有机质含量增加以及粘粒的淋移所致,其他研究也发现相似的结果<sup>[1]</sup>。

侵蚀地系统中由于土壤已被侵蚀至网纹层,其容重较高,在  $1.50\text{g}/\text{cm}^3$  以上。林草系统的土壤容重较侵蚀地系统低,其中草地系统的土壤容重略高,林地系统较低。总体上看,园耕地系统表层土壤容重(平均值为  $1.43\text{g}/\text{cm}^3$ )较荒草地(平均值为  $1.32\text{g}/\text{cm}^3$ )高,特别是在江西余江的耕地系统中,耕种 100 年的旱地和水旱轮作地的土壤容重明显增加,而浙江兰溪的 30 年旱地容重较 5 年旱地的略低,水旱轮作后的土壤容重变化不大。

土壤总孔隙度( $P$ )是由土壤比重( $d$ )和容重( $d_v$ )计算而得:  $P = \left(1 - \frac{d_v}{d}\right) \times 100\%$ 。侵蚀地系统中的土壤总孔隙度较低,林草系统的表层土壤总孔隙度较高(平均为 51.1%),而园耕地系统总体上(平均值为 46.7%)较荒草地系统低,其变化趋势与土壤容重相反。

2.3.2 土壤孔隙度的分布 孔隙的分布状况比总孔隙度更能反映土壤结构的好坏。表 5 的数据表明,侵蚀地系统的土壤孔隙分布状况较差,非活性孔隙( $<0.2\mu\text{m}$ )比例较高,而通气( $>30\mu\text{m}$ )和毛管孔隙( $30-0.2\mu\text{m}$ )比例较低。次生和人工针阔叶林的分布状况较好,其非活性孔隙比例较低,而毛管孔隙比例较高。其它系统虽然变化不同,但从整体上看,其分布状况均较针阔叶林差。在园地系统中,桔园的通气孔隙和非活性孔隙较茶园

表6 不同土地利用系统中红壤的毛管孔隙分布状况(占总毛管孔隙的%)

Table 6 Capillary pore composition of red soil in various land use systems

序号	毛管孔隙分布 Capillary pore(%)											
	30-20 $\mu\text{m}$		20-10 $\mu\text{m}$		10-5 $\mu\text{m}$		5-3 $\mu\text{m}$		3-1 $\mu\text{m}$		1-0.2 $\mu\text{m}$	
No.	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm
J1	4.0		5.4		6.3		10.2		4.3		69.7	
J2	29.9	26.7	34.4	30.5	6.9	5.5	5.9	5.3	7.4	5.2	15.5	26.7
J3	20.9	17.9	16.4	9.6	15.5	11.1	14.3	15.0	16.3	13.5	16.7	33.0
J4	8.9	10.3	11.6	5.9	11.4	11.5	14.6	13.3	14.6	12.6	38.9	46.4
J5	21.6	29.6	19.3	30.2	5.0	5.4	6.6	5.6	5.3	5.3	42.3	23.9
J6	21.7	18.2	16.9	15.9	21.3	15.1	15.5	9.0	19.5	11.3	5.1	30.5
J7	19.0	21.2	25.3	16.5	4.7	4.3	6.1	5.0	5.2	4.9	39.8	48.1
J8	4.4	5.2	12.5	8.6	10.5	8.5	16.0	15.0	6.5	8.3	50.2	54.4
J9	29.5	24.4	12.8	9.6	5.8	5.7	7.6	25.6	4.3	6.3	39.9	28.4
Z1	8.2		10.4		17.8		12.6		31.5		19.6	
Z2	11.0	10.0	8.5	8.6	6.2	3.4	6.4	5.9	11.6	9.2	56.4	62.8
Z3	17.0	17.8	9.9	7.7	13.0	13.4	35.1	35.2	22.6	22.5	2.4	3.5
Z4	16.5	13.7	5.2	8.4	11.3	11.6	34.3	28.9	19.4	20.0	13.4	17.5
Z5	15.2	14.0	10.8	7.7	8.8	7.6	7.0	8.9	13.3	11.7	44.9	50.2
Z6	17.7	19.9	16.0	11.3	14.9	12.8	14.8	11.7	20.4	16.4	16.1	27.9
Z7	15.9	19.1	11.7	11.3	9.4	13.9	25.7	31.1	20.6	22.1	16.8	2.6
Z8	13.4	16.4	13.0	12.7	12.2	15.7	24.2	24.1	14.1	19.3	23.1	11.8
Z9	3.4	4.4	2.5	3.3	4.5	6.1	46.4	26.2	6.1	13.8	37.1	46.2



少,而毛管孔隙较茶园高。在旱地系统中。江西余江 100 年旱地的毛管孔隙较 30 年旱地的少,而非活性孔隙较后者多,通气孔隙相当;而浙江兰溪 30 年旱地的孔隙分布状况较 10 年旱地的好。与 30 年旱地相比,水旱轮作系统中的土壤通气孔隙比例下降,毛管孔隙略有增加。江西余江的水旱轮作系统中总孔隙和毛管孔隙明显较浙江兰溪低,这可能与其水耕年限长、土壤中淀浆板结作用严重有关。在红壤地区,一般以通气孔隙达 10% 以上作为土壤通气的临界指标,这样看来水旱轮作地和荒草地系统的通气状况较差,此外江西的旱地和桔园系统也很差。

毛管孔隙的分布状况影响着土壤中供水和持水性能。从分布上看(表 6),各个系统中土壤 1—0.2 $\mu\text{m}$ 孔径所占的比例大多较高,10—5 $\mu\text{m}$ 孔径所占的比例大多较低。在侵蚀地系统中,毛管孔隙的分布不均匀,集中在 3—0.2 $\mu\text{m}$ 孔径范围内。在林草地系统中,人工马尾松林和荒草地土壤中毛管孔隙的分布状况较阔叶林系统均匀。在园地系统中,茶园土壤中毛管孔隙的分布明显较桔园系统均匀。在耕地系统中,旱地土壤中毛管孔隙的分布状况不均匀,水旱轮作系统比旱地系统更差。

2.3.3 土壤持水特性 我们利用幂函数( $Y = aX^{-b}$ )模拟红壤水分含量( $Y$ )与红壤吸持力( $X$ )之间的关系,从相关系数上看均达到显著相关(表 7)。在以往的研究中,土壤有效水被分为易效水和难效水,并根据比水容量( $C_0$ )的大小进行划分, $C_0$ 是土壤水含量与土壤吸

表7 不同土地利用系统中红壤水分特征曲线拟合方程的参数值

Table 7 Parameter value of model equation for water characteristic curve of red soil in various land use systems

代号 No.	幂函数的参数Parameter of power fuction				相关系数 Correlation coefficient		$a \cdot b$	
	0-20cm		20-40cm		0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm
	$a$	$b$	$a$	$b$				
J1	469.8	0.068			0.879		31.9	
J2	1128.9	0.148	1206.2	0.151	0.957	0.960	167.1	178.5
J3	796.9	0.120	769.8	0.114	0.990	0.996	95.6	92.4
J4	580.6	0.090	530.1	0.079	0.981	0.974	52.3	47.7
J5	747.4	0.102	893.5	0.104	0.944	0.942	76.2	91.1
J6	695.3	0.101	769.9	0.102	0.984	0.985	70.2	77.8
J7	762.1	0.128	823.2	0.116	0.940	0.903	97.5	105.4
J8	372.5	0.059	446.0	0.070	0.966	0.943	22.0	26.3
J9	364.9	0.071	422.5	0.079	0.946	0.945	25.9	30.0
Z1	336.7	0.039			0.994		13.1	
Z2	975.5	0.118	1088.1	0.131	0.911	0.848	115.1	128.4
Z3	595.9	0.099	564.7	0.090	0.981	0.982	59.0	55.9
Z4	611.3	0.097	556.0	0.105	0.985	0.992	59.3	53.9
Z5	606.3	0.108	634.8	0.106	0.952	0.929	65.5	68.6
Z6	465.0	0.086	510.1	0.088	0.994	0.992	40.0	43.9
Z7	485.5	0.083	631.5	0.093	0.993	0.984	40.3	52.4
Z8	669.1	0.104	662.5	0.101	0.995	0.988	69.6	68.9
Z9	777.4	0.095	458.1	0.063	0.865	0.916	73.9	43.5

持力间函数的导数<sup>[23]</sup>:  $C_0 = -\frac{dX}{dY} = a \cdot bX^{-(b+1)}$ . 难效水是指  $C_0$  在  $10^{-2}$  量级 (毫升/巴·

克) 范围时的土壤水。上式表明,  $C_0$  随着  $a \cdot b$  值的增加而增加,  $a \cdot b$  值愈高说明土壤的持水性能愈好。表 7 的数据表明, 侵蚀地系统的  $a \cdot b$  值较小, 其易效水比例较低。在林草地系统中, 针阔叶林系统的  $a \cdot b$  值较高, 而且是所有系统中最高的。在园地系统中, 桔园系统的值高于茶园系统。在江西余江旱地系统中, 100 年旱地的值较 30 年旱地低, 水旱轮作系统的值仍很低; 而在浙江兰溪的旱地系统中, 30 年旱地的值较 10 年旱地高, 水旱轮作后, 其值增加。

## 2.4 土壤物理学肥力演化的评价

由于上述的红壤物理学肥力指标 (包括计算的次生指标) 数量较多, 因此我们利用数理统计软件 STAT 对这些指标进行聚类分析, 从中提取出重叠较少的评价指标, 然后利用因子分析确定其权重系数。

第一步, 对数据进行标准化处理。由于各指标单位不统一, 为使其具有统一的分布形式, 我们采用简化的评分函数法进行转换<sup>[10]</sup>。

第二步, 通过聚类分析选择重叠度小的物理学肥力指标。从绘制的各指标间欧几里德距离 (Euclidean distance) 连接图 (图 1) 上看, 大多数物理学指标间的距离  $> 1.3$ , 这与土壤化学指标间的距离关系不同, 后者很多指标间的距离  $< 0.8$ , 说明物理学肥力指标间的重叠性较小。仅在土壤比重 (SG) 和总孔隙度 (TPO) 之间以及参数乘积  $a \cdot b$  (AB) 和毛管孔隙度 (CPO) 之间的距离  $< 0.9$ , 可以相互替代, 据此我们选择了总孔隙度和毛管孔隙度 2 个指标。其余 11 项指标包括: 粘粒 (CLAY)、物理性粘粒 (PCLAY)、粉粘比 (SC)、 $> 1\text{mm}$  大团聚体 (LAG)、 $< 0.25\text{mm}$  微团聚体 (MAG)、微团聚体中  $< 0.02\text{mm}$  部分的比例 (FMAG)、结构系数 (S)、微团聚体保持率 (F)、通气孔隙度 (APO)、毛管孔隙中  $10-3\mu\text{m}$  部分的比例 (MCPO), 由于重叠度较小, 因此全部选入评价指标体系, 其中  $< 0.02\text{mm}$  微团聚体的比例反映了土壤微团聚体的品质, 而  $10-3\mu\text{m}$  部分毛管孔隙的比例反映了土壤毛管孔隙分布的均匀程度。

第三步, 利用因子分析计算各项指标的权重系数。从计算出的各主成分的贡献率上看, 前 4 个主成分的贡献率分别占总方差的 28.0%、24.4%、15.7% 和 9.0%, 其累计贡献率已满足信息提取的要求。然后进行正交旋转, 计算因子载荷矩阵, 各主因子中载荷量  $> 0.6$  的因子是其主要因子。结果表明, 第一个主因子主要反映了土壤毛管孔隙、毛管孔隙中  $10-3\mu\text{m}$  部分的比例和  $> 1\text{mm}$  大团聚体这 3 个特性; 第二个主因子主要反映了物理性粘粒、粉粘比、容重和微团聚体保持率状况; 第三个主因子主要反映了土壤结构系数、土壤粘粒和微团聚体中  $< 0.02\text{mm}$  部分的比例状况; 第四个主因子主要反映了微团聚体、总孔隙度和通气孔隙度状况。其中前两个主因子是红粘土红壤物理学肥力变化的主要方面。

根据计算出的各个土壤物理指标的公因子方差值确定其权重系数<sup>[10]</sup>, 最后计算各土壤的物理学肥力指数 (PFI, Physical Fertility Index): 
$$\text{PFI} = \sum_{i=1}^{12} k_i \times C_i$$
。式中,  $k_i$  是各个肥力指标的权重系数,  $C_i$  是各个肥力指标的隶属度值。

从评价的结果看 (表 8), 侵蚀地系统的 PFI 较林草地系统低。林草地系统的 PFI 与园

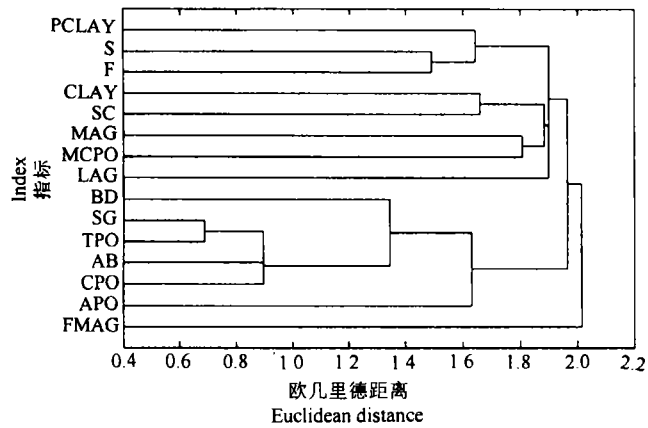


图1 红粘土土壤物理学肥力指标的聚类分析图

Fig. 1 Cluster analysis diagram of physical fertility indexes of red soil derived from Quaternary red clay

耕地系统相比并不低,其中马尾松林系统的表层土壤 PFI 最高,说明在中亚热带的丘陵红壤区,马尾松林植被能较好地保持土壤表层的物理结构。

从平均值上看,江西余江园耕地系统中表层土壤的 PFI(0.615)较林草地系统(0.651)

表8 不同土地利用系统中土红壤物理学肥力指数值

Table 8 Physical Fertility Index (PFI) of red soil in various land use systems

土样编号 No. of soil sample	PFI		土样编号 No. of soil sample	PFI	
	0-20cm	20-40cm		0-20cm	20-40cm
J1	0.612		Z1	0.549	
J2	0.629	0.620	Z2	0.638	0.651
J3	0.680	0.602	Z3	0.681	0.647
J4	0.644	0.581	Z4	0.635	0.595
J5	0.579	0.518	Z5	0.605	0.635
J6	0.712	0.629	Z6	0.748	0.672
J7	0.587	0.575	Z7	0.658	0.571
J8	0.614	0.685	Z8	0.731	0.657
J9	0.581	0.620	Z9	0.619	0.611

低,而浙江兰溪的值(0.672)较林草地系统(0.651)高;但是下层土壤的 PFI 差异很小。这说明与林荒地相比,耕垦后表层红粘土红壤的物理学肥力在江西表现出退化,而在浙江则有一定程度的进化,但在下层则变化不大。

在园地系统中,茶园系统的 PFI 较桔园系统高,可能与茶园中有机肥投入水平高有关。在耕地系统中,随着耕种年限的增加,表层土壤的 PFI 也增加,而与化学肥力的变化趋势不同的是水旱轮作系统的 PFI 较早地系统的低,这说明旱耕熟化过程中,由于土地的不断投入,红粘土红壤的物理学肥力随着提高,但水旱轮作不利于土壤结构的保持。

江西余江各个系统中的 PFI 与浙江兰溪的相比,总体上林草地系统相当,而江西余江园耕地系统中的 PFI 较浙江兰溪的低,说明前者物理学肥力在耕垦后的退化状况较后者

严重。

### 3 结 论

1. 中亚热带红粘土红壤丘陵区, 耕垦年限较长的耕地土壤比重明显降低, 园耕地系统表层土壤容重较林草系统降低。

2. 侵蚀地表土孔隙状况最差; 林草地表土总孔隙度较高, 其分布的均匀程度较差; 园耕地土壤总孔隙度较荒地系统低, 但毛管孔隙增多; 旱耕熟化过程提高了毛管孔隙的分布均匀度, 但水旱轮作后孔隙分布状况更差。

3. 与林草地土壤相比, 耕垦作用破坏了表土的大团聚体结构, 而且使得表土微团聚体数量降低, 但其品质提高。随着旱耕熟化和水旱轮作过程, 表土大团聚体比例增加。

4. 总体上看, 红粘土红壤的物理学肥力以侵蚀地系统为最低, 而以马尾松林地系统为最高。与林荒地相比, 耕垦后表土物理学肥力在江西表现出退化, 而在浙江则有一定程度的进化。旱地土壤的物理学肥力随着熟化过程而提高, 但水旱轮作过程不利于物理学肥力的提高。

5. 红粘土红壤的物理学肥力在不同利用过程中的演变主要反映在土壤毛管孔隙及其分布、大团聚体含量、物理性粘粒、容重和微团聚体保持率的变化上。

### 参 考 文 献

1. 姚贤良, 于德芬. 赣中丘陵地区红壤性水稻土的结构状况及其肥力意义. 土壤学报, 1962, 10(3): 267—289
2. 钱泽澎, 何福恒, 冯孝善. 红壤微生物学特性(一)浙江省低丘红壤的微生物学分析. 土壤学报, 1964, 12(4): 390—400
3. 林明海, 赖庆旺. 不同熟化度红壤及红壤性水稻土的腐殖质组成及其特征. 土壤学报, 1982, 19(3): 227—247
4. 邓铁金, 樊友安, 周任发. 红壤性水稻土的形成过程特点及其肥力演变. 土壤学报, 1985, 22(1): 1—11
5. 范本兰, 杜国华. 江西低丘红壤性水稻土的主要化学特性研究. 土壤学报, 1985, 22(2): 183—190
6. 周礼恺, 严昶升, 武冠云. 土壤肥力实质的研究, III. 红壤. 土壤学报, 1986, 23(3): 193—203
7. 陈恩凤编著. 土壤肥力物质基础及其调控. 北京: 科学出版社, 1991
8. 黎孟波, 张先婉. 聚土免耕耕作法的土壤肥沃度评价——土壤肥力研究之四. 见: 张先婉主编. 土壤肥力研究进展. 北京: 中国科学技术出版社, 1991, 235—241
9. 裴德安, 刘 助, 古国裁. 红壤熟化过程中的肥力演变. 见江西省红壤试验站, 江西省农牧渔业厅土地利用管理局编, 江西红壤研究(第二集). 南昌: 江西科学技术出版社, 1987, 49—66
10. 孙 波, 赵其国, 张桃林. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价. 土壤学报, 1995, 32(4): 362—369
11. 中国科学院土壤研究所广东工作组. 广东省几种水稻土耕层中团聚体与土壤耕性及肥力的关系. 土壤通报, 1961, 1(3): 24—30
12. 钱胜国. 江西丰城红壤及红壤性水稻土的水分物理性质及其演变规律. 土壤通报, 1961, 1(5): 13—28
13. 何 群, 陈家坊. 第四纪红土发育的水稻土微团聚体特性的初步研究. 土壤学报, 1964, 12(1): 267—289
14. 姚贤良, 于德芬. 赣中丘陵地区红壤及红壤性水稻土的胶结物质及其与土壤结构形成的关系. 土壤学报, 1964, 12(1): 267—289
15. 姚贤良, 于德芬. 红壤的物理性质及其生产意义. 土壤学报, 1982, 19(3): 224—236
16. 姚贤良, 许绣云, 于德芬. 不同利用方式下红壤结构的形成. 土壤学报, 1990, 27(1): 25—33
17. 许绣云, 姚贤良. 红壤生态站土壤的结构状况. 见: 中国科学院红壤生态开放生态站主编. 红壤生态系统研究(第二集). 南昌: 江西科学技术出版社, 1993. 255—261

18. 邓时琴,徐梦熊. 中国颗粒研究, III. 赣中丘陵红壤及其颗粒的物理特征. 土壤学报, 1990, 27(4): 368—376
19. 唐淑英,钟继洪,杨兴邦. 新垦赤红壤结构特性的演化. 土壤学报, 1995, 32(3): 253—265
20. 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室编. 土壤物理性质测定法. 北京: 科学出版社, 1978. 26—95
21. 姚贤良,于德芬. 赣中丘陵地区红壤的不同结构对某些水分物理性质的影响. 土壤学报, 1966, 14(1): 65—72
22. 樊润威,朱济成,姚贤良. 赣中丘陵地区红壤及红壤性水稻土的孔隙性. 土壤学报, 1966, 14(2): 196—205
23. 庄季屏,王 伟. 土壤低吸力段持水性能及其与土壤干旱的关系研究. 土壤学报, 1986, 23(4): 306—313

## FERTILITY EVOLUTION OF RED SOIL DERIVED FROM QUATERNARY RED CLAY IN LOW-HILLY REGION IN MIDDLE SUBTROPICS I. EVOLUTION OF SOIL PHYSICAL FERTILITY

Sun Bo Zhang Tao-lin Zhao Qi-guo

(*Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing 210008*)

### Summary

The characteristics of physical fertility evolution under various land use patterns of red soil derived from Quaternary red clay in low-hilly region in the middle subtropics were researched, then the evaluation indexes were selected with cluster analysis and their weight coefficients determined with factor analysis. Results showed that the soil physical fertility in forest and grass land systems was not obviously lower than in cultivated land systems as soil chemical fertility showed. In the systems in Jiangxi Province, the soil physical fertility degraded with the reclamation, which was mainly expressed by the destroy of soil structure, the decrease of soil larger aggregate and microaggregate, the drop of soil aeration and capillary porosity and the uneven-distributed capillaries. However in those systems in Zhejiang Province, it rose with the reclamation. In cultivated land systems, the upland soil physical fertility increased with the cultivation, but the upland crops-rice rotation has a disadvantageous effect. The soil physical fertility in tea garden system was higher than that in citrus orchard.

**Key words** Middle subtropics, Low-hilly region, Red soil, Soil physical fertility, Evolution