

# 丘陵红壤耕作利用过程中土壤肥力的演变和预测\*

孙 波 王兴祥 张桃林

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘 要** 通过区域尺度上两个时段的定位采样, 结合田块尺度上的长期试验, 研究了耕作利用变化对我国中亚热带低丘红壤区土壤肥力演变的影响。分析了土壤肥力演变的驱动力, 建立了土壤养分变化与养分平衡间的相关预测模型。对比分析表明, 丘陵红壤肥力的变化与养分平衡量的变化趋势一致。在保持荒地和水田利用方式时, 土壤有机质含量显著降低; 旱地系统中速效磷和速效钾含量增加, 但在不施肥的针阔混交林中却下降; 荒地开垦为水田后, 土壤肥力有增加趋势。旱坡地红壤全氮和速效钾的变化量与氮、钾的平衡量的显著相关, 而土壤速效磷与磷的平衡量间相关不显著, 其原因是没有考虑磷的固定和矿化。

**关键词** 低丘, 红壤, 肥力, 演变, 预测

**中图分类号** S158

土壤肥力的演变受母质、地形等内在因素以及耕作、施肥等外在因素的综合影响, 具有时空变化特征。研究土壤肥力在时间尺度上变化的经典方法是长期监测试验, 如英国洛桑试验站于 1843~ 1856 年开始的经典试验<sup>[1]</sup>, 我国在 80 年代起也开展了长期施肥网研究<sup>[2]</sup>。另一种方法是针对不同利用年限的田块, 采集系列土壤样品, 研究土壤肥力的变化<sup>[3]</sup>。国内对区域尺度土壤肥力演变的研究, 方法大多是在同一区域内, 选择不同时段、不同利用方式下的田块, 采样对比分析土壤肥力的时空变化<sup>[4]</sup>, 其中全国第二次土壤普查是重要的参比系<sup>[5]</sup>。虽然研究者开始注重采样点位置的可比性<sup>[6]</sup>, 由于不同历史时期的资料、研究方法、研究地点、研究尺度等的差异, 对比采样研究方法存在可比性缺陷。

中亚热带湘、赣、浙三省是丘陵红壤的主要分布区, 低丘红壤荒坡地由于长期受侵蚀等退化过程的影响, 土壤养分水平已跌至“谷底”; 开垦利用后, 土壤养分随着耕垦熟化过程不断提高<sup>[7]</sup>; 但某些土壤养分, 特别是钾素仍存在退化现象<sup>[8]</sup>。不同利用方式下, 红壤荒地有机质的增幅大小与土壤养分年均盈余量的变化一致<sup>[3]</sup>。近来, 研究者通过空间定位采样方法研究丘陵红壤<sup>[9]</sup>, 研究尺度也扩展到东部红壤区域<sup>[6]</sup>; 同时, 研究者利用有机质分解模型及养分平衡预测红壤肥力的变化<sup>[9, 10]</sup>。

研究低丘红壤肥力的时空变化特征和影响因子是合理开发中亚热带低丘红壤资源的理论基础。本文利用点面结合的原则, 通过区域尺度上不同时段定点采样, 结合田块尺

\* 中国科学院知识创新工程方向性项目(KZCX2-413)和国家教育部留学基金资助

收稿日期: 2001-06-01; 收到修改稿日期: 2001-12-25

度上的定位试验,研究耕作利用变化对低丘红壤肥力的影响,并通过养分循环和平衡分析土壤肥力的变化原因,最终建立土壤养分变化的经验预测模型。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

研究区域位于江西省余江县中国科学院红壤生态实验站(28°13'N, 116°55'E),具有中亚热带季风气候,年均温 17.8℃,年均降雨量 1 785 mm。地形为低丘岗地,海拔 35.0~54.6 m,坡度为 5~8°。典型土壤为第四纪红粘土发育的红壤,此外还有少量第四纪红粘土坡积物发育的水稻土。研究区域垦殖利用(1985年)前的主要植被为稀疏的马尾松林并覆盖草被。

### 1.2 土壤样品采集及分析

在试验站 1.1 km×2.0 km 的区域内,以 100 m×100 m 的网格法采集了 105 个表层(0~15 cm)土壤样品。样品分别在 1985 年和 1997 年 10 月采集,1985 年采集后在 1:3000 的地形图上标注了采样的方格及采样点位置,1997 年根据标注图重新采样,其中保持荒地(WW)和水田(PP)利用方式的样点数分别为 42 和 10,荒地开垦用作旱地(包括果树-旱作间作)(WP)、水田(WP)和针阔混交林(WF)的样点数分别为 33、10 和 10。

### 1.3 田间定位试验

田间定位试验的径流小区面积 5 m×20 m,四周用水泥板封闭(地面高 20 cm,埋深 30 cm)。1992 年开垦利用,设置五个耕作处理(表 1)。1992 年原始土壤的有机质、全 N、速效 P 和速效 K 含量分别为 7.2 g kg<sup>-1</sup>、0.58 g kg<sup>-1</sup>、0.83 mg kg<sup>-1</sup>和 29.6 mg kg<sup>-1</sup>,土壤 pH(水提)为 4.7,阳离子交换量为 8.84 cmol kg<sup>-1</sup>。

表 1 旱坡地红壤耕作方式和施肥处理

Table 1 Management and fertilization for field treatments of slopping upland red soils

处理 Treat- ment	耕作方式 Cultivation	轮作方式 Crop rotation	尿素 Urea (N kg hm <sup>-2</sup> )	钙镁磷肥 Ca-Mg-phosphate (P kg hm <sup>-2</sup> )	KCl (K kg hm <sup>-2</sup> )
1	传统耕作	花生-绿肥(萝卜菜)	69	39	75
2	常规耕作	玉米+大豆-荞麦-油菜	416	59	523
3	低垄	大豆+红薯-油菜	196	59	311
4	免耕覆盖	玉米+大豆-荞麦-油菜	416	59	523
5	高垄	大豆+红薯-油菜	196	59	311

### 1.4 土壤分析

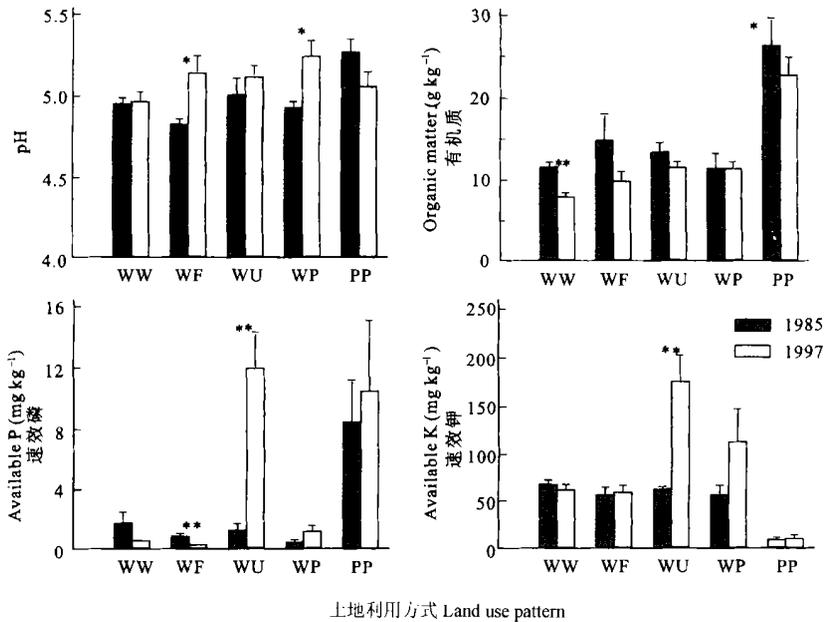
土壤有机质用硫酸-重铬酸钾湿烧法,土壤全氮用凯氏法,土壤速效钾用 1 mol L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>Ac 提取,土壤速效磷用 0.5 mol L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub>(pH 8.5) 提取,土壤 pH 用 1:2.5 的土水比测定,阳离子交换量用中性醋酸铵交换法<sup>[11]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同利用和耕作方式下土壤肥力的演变

从整个研究区域看,土壤有机质的平均含量从 1985 年的 14.1 g kg<sup>-1</sup> 减少到 1997 年

的  $11.2 \text{ g kg}^{-1}$ ; 土壤速效磷和速效钾含量平均值分别从  $2.8$  和  $65.8 \text{ mg kg}^{-1}$  增加到  $5.3$  和  $98.4 \text{ mg kg}^{-1}$ ; 而土壤 pH 变化不大(均为  $5.0$ )。与 1985 年相比, 土地利用方式改变后土壤的平均 pH 有增加趋势(图 1)。保持荒地利用方式时, 土壤 pH 均值变化不大; 而保持水田利用方式时土壤 pH 有下降趋势。在利用 12 年后土壤有机质的平均含量均有下降, 其中保持荒地和水田利用方式时, 土壤有机质的降低达到显著水平。荒地转变为针阔混交林后, 土壤速效磷显著下降, 而开垦为旱地后, 土壤速效磷和速效钾显著上升。在保持水田的方式下, 以及在荒地转为水田后, 土壤速效磷钾有增加趋势, 但差异不显著。说明荒地开垦为水田后, 土壤肥力有增加趋势。



WW:荒地, WF 荒地转林地, WU:荒地转旱地, WP 荒地转水田, PP 水田垂直线表示方差 \*和 \*\* 分别表示显著 ( $P<0.05$ ) 和极显著 ( $P<0.01$  差异)

图 1 土地利用方式改变引起的土壤肥力性质的变化(1985~ 1997 年)

Fig. 1 Changes of soil chemical properties with land use patterns between 1985 and 1997

径流小区的试验结果表明(表 2), 红壤荒地开垦为旱地后, 土壤肥力水平提高, 土壤速效磷和速效钾的增幅高于土壤有机质和全氮的增幅。不同的耕作方式下土壤养分提高水平不一样, 进行常规耕作(处理 2)和免耕覆盖(处理 4)的玉米+ 大豆—荞麦—油菜轮作中, 土壤氮磷钾养分的提高幅度高于其他轮作和耕作系统。

### 2.2 生态系统养分平衡与土壤肥力的演变

养分循环是生态系统演变的驱动力, 也是土壤肥力时空变化的根本原因。社会经济和环境因素的变化, 直接或间接影响了生态系统的养分循环, 最终影响了土壤肥力的演变。因此, 可以从生态系统养分平衡与土壤养分变化间的相互关系, 预测土壤肥力的演变趋势。

在田块尺度上(径流小区), 通过监测不同耕作方式下红壤旱地系统中的养分投入(肥

表 2 不同耕作方式下旱坡地红壤性质的变化

Table 2 Changes of soil properties in different management of slopping upland red soils

处理	Δ 有机质		Δ 全 N		Δ 速效 P		Δ 速效 K		Δ pH
Treat-	Change of OM		Change of TN		Change of AP		Change of AK		
ment	(g kg <sup>-1</sup> )	(%)	(g kg <sup>-1</sup> )	(%)	(mg kg <sup>-1</sup> )	(%)	(mg kg <sup>-1</sup> )	(%)	
1	6.2	86.1	0.19	32.8	5.20	559	21.8	73.6	0.7
2	7.3	101	0.30	51.7	6.25	672	258	870	1.0
3	7.8	108	0.24	41.4	6.12	658	93.3	315	0.8
4	8.0	111	0.40	69.0	6.77	728	301	1016	1.0
5	7.8	108	0.26	44.8	6.07	653	131	443	0.9

料、种子、雨水、固氮、秸秆还田)和损失过程(径流、淋失、氮素挥发、作物吸收),可以计算出不同系统中养分的平衡情况(表 3)。结果表明,除了花生—绿肥轮作系统(传统耕作)中的钾素亏缺外,其它旱作系统中的土壤氮磷钾养分均有一定盈余,尤其以免耕覆盖方式下养分的盈余最大。旱作系统中磷的相对盈余比例在所有养分中最高,这可能是磷素输出量少的结果。

相关分析表明,土壤全氮和速效钾的年均变化量与氮和钾的年均平衡量之间的存在显著的相关性,其相关回归方程分别为:

$$Y_N = 0.0443 + 0.000156X_N \quad (r = 0.911, n = 5, p < 0.05)$$

$$Y_K = 12.7 + 0.147X_K \quad (r = 0.964, n = 5, p < 0.01)$$

式中  $Y_N$  和  $Y_K$  分别为土壤全氮和速效钾的年均变化量,单位是  $\text{mg kg}^{-1}$ ;  $X_N$  和  $X_K$  分别为氮和钾的年均平衡量,单位是  $\text{kg hm}^{-2}$ 。

土壤速效磷的变化量与磷的平衡量之间相关不显著,其回归方程为:

$$Y_P = 1.28 + 0.00592X_P \quad (r = 0.484, n = 5, p > 0.05)$$

式中  $Y_P$  为土壤速效磷的年均变化量,  $X_P$  为磷的年均平衡量。相关不显著的原因可能有两个,一个是没有考虑红壤对化肥磷素固定以及不同耕作方式对土壤磷素固定过程的影响;另一个是在计算磷的输入量时,对还田秸秆部分磷的有效性估计过高,没有考虑不同耕作方式下有机磷的矿化过程。

鲁如坤等<sup>[11]</sup>的长期试验表明,红壤性水稻土速效磷在施肥 12 年后的变化量与磷平衡量间呈极显著相关,而全氮和速效钾没有表现出显著的相关性。氮和钾素相关性较差的原因可能是在计算中只考虑了肥料投入和作物吸收,而没有考虑养分挥发、径流和淋溶损失,而肥料磷没有挥发和淋溶损失,所有表现出显著的相关性。

对全国化肥试验网长期试验结果<sup>[2]</sup>的相关分析表明,在没有全面考虑土壤氮素投入和损失的情况下,土壤全氮或速效氮的变化量与氮平衡量之间相关不显著;但是由于土壤中磷素和钾素的转化没有氮素复杂,因此土壤速效磷、钾的变化量与其平衡量间大多呈现显著或极显著相关(表 4)。

上述分析表明,在田块尺度上,通过对农田生态系统养分循环的平衡分析,可以预测土壤中养分的变化趋势和程度。在红壤丘陵区小流域尺度上,由于没有每个采样点的养分循环数据,因此通过定位小区和径流场试验对不同利用系统养分循环与平衡进行分析,

表 3 不同旱作系统中养分的平衡

Table 3 Nutrient balance in upland crop systems with different managements

处理 Treatment	养分 Nutrient	年均输入量 Annual input ( $\text{kg hm}^{-2}$ )				年均输出量 Annual output ( $\text{kg hm}^{-2}$ )				盈亏 Balance ( $\text{kg hm}^{-2}$ )		
		有机肥 Organic manure	化肥 Chemical fertilizer	雨水 Rain	种子 Seed	生物固氮 Biological fixation N	秸秆 Crop residue	径流 <sup>1)</sup> Runoff	淋失 Leaching		氮肥损失 Gaseous loss of N	作物 Crop uptake
1	N	79.3	69.0	23.5	8.8	83.2	41.7	18.1	44.2	17.4	221.9	3.8
	P	22.1	39.3	0	1.0	0	8.9	0.3	0	0	31.4	39.6
	K	70.0	74.7	4.9	1.0	0	56.3	17.0	3.7	0	162.2	24.0
2	N	79.3	373.2	23.5	4.6	23.8	4.1	19.4	38.3	41.8	143.6	265.4
	P	22.1	59.0	0	0.4	0	1.0	0.4	0	0	31.7	50.5
	K	70.0	522.9	4.9	2.3	0	24.0	19.7	32.0	0	211.3	361.1
3	N	79.3	195.5	23.5	4.2	42.9	1.1	1.8	21.2	27.6	172.9	123.0
	P	22.1	59.0	0.0	0.4	0	0.3	0.1	0	0.0	52.9	28.4
	K	70.0	311.3	4.9	2.6	0	8.4	10.2	9.1	0.0	315.7	62.2
4	N	79.3	373.2	23.5	4.8	27.5	25.5	5.1	47.0	41.8	156.0	283.9
	P	22.1	59.0	0	0.4	0	8.1	0.2	0.0	0.0	33.8	55.8
	K	70.0	522.9	4.9	2.3	0	135.6	15.8	64.3	0.0	229.8	425.8
5	N	79.3	195.5	23.5	4.8	38.7	0.9	2.8	19.0	27.6	161.1	132.5
	P	22.1	59.0	0	0.6	0	0.3	0.1	0	0	49.9	32.0
	K	70.0	311.3	4.9	3.7	0	7.6	12.3	15.3	0	307.0	62.9

1) 径流损失计算中氮是土壤全氮、磷和钾是速效 P 和速效 K

表 4 土壤速效磷钾与作物系统磷钾平衡量之间的相关分析

Table 4 Correlation analysis between changes of soil available P and K and the balance of P and K in cropping systems with long-term experiment

地点 Location	土壤 Soil	利用方式 Land-use	试验年限 Exp. year	处理数 Treatment number	${}^1)Y_P = a + bX_P$			$Y_K = a + bX_K$		
					a	b	p	a	b	p
广东广州	黄坭田	水田	10	10	10.94	0.0721	<0.01	22.8	0.0290	<0.01
广东慧阳	冲积性水稻土	水田	13	6	6.94	0.0615	<0.01	21.7	0.0238	<0.01
天津西郊	潮土	旱地	15	7	-8.03	0.0148	<0.05	-30.7	0.0209	0.08
江西进贤	红壤性水稻土	水田	13	10	0.73	0.00933	<0.01	-24.7	0.0113	<0.01
上海青浦	青紫泥	水旱轮作	12	8	2.24	0.0168	<0.01	-26.4	0.0110	0.06
河南郑州	黄潮土	旱地	13	8	-8.71	0.0178	<0.05	-11.5	0.0100	<0.05
湖南望城	红黄泥田	水田	13	9	11.10	0.0713	<0.01	55.4	0.0604	<0.01

1)  $Y_P$  和  $Y_K$  分别为长期试验前后土壤速效磷和速效钾的变化量( $\text{mg kg}^{-1}$ ),  $X_P$  和  $X_K$  分别为长期试验期间农作物系统钾和磷的平衡量( $\text{kg hm}^{-2}$ )

结果表明<sup>[12]</sup>,不同土壤利用系统中磷和钾的平衡量(表5)与土壤中速效磷和速效钾的变化趋势一致(图1)。

表5 不同利用系统中养分的年均输入、输出和平衡(kg hm<sup>-2</sup>)

Table 5 Annual input, output and balance of nutrients in different land use systems

利用方式 Land use system	P			K		
	输入 Input	输出 Output	平衡 Balance	输入 Input	输出 Output	平衡 Balance
荒地	1.8	4.2	-2.4	30.6	75	-44.4
针阔混交林	13	15.2 <sup>b</sup>	-2.2	139	84	55
花生-绿肥	82	48	34	408	335	73
柑桔+花生-绿肥	294	92	202	486	450	36
稻-稻-肥	167	79.6	87.4	476	359	117

1) 包括年生物量为 11.4t hm<sup>-2</sup>的枝叶吸收量 14.5kg hm<sup>-2</sup>和地表径流量 0.69 kg hm<sup>-2</sup>。

鲁如坤等在红壤性水稻土上的试验施钾水平低(K 124.5 kg hm<sup>-2</sup>)<sup>[10]</sup>,对余江县洪湖乡水田系统的调查也表明钾素处于亏缺状态,所以土壤速效钾呈减少趋势。本文的径流区试验中,施钾水平较高,而在红壤生态实验站站区,除了荒地外,其他系统施钾水平高于当地,钾素处于盈余水平,因此土壤速效钾增加。这证明了提高土壤钾素供应水平,可以改变土壤钾素的平衡,从而阻止土壤钾素的退化。

红壤丘陵区土壤有机质的普遍减少与凋落物和有机肥进入量少、土壤有机质径流和分解损失较大有关。对研究区域典型利用方式的研究表明<sup>[13]</sup>,马尾松林和针阔混交林的年均凋落量分别为 10.1 和 8.56 t hm<sup>-2</sup>,土壤有机碳年均形成量分别为 509 和 392 kg hm<sup>-2</sup>,土壤侵蚀引起的土壤有机碳年损失量分别为 204 和 135 kg hm<sup>-2</sup>,土壤有机碳年均矿化量分别为 402 和 278 kg hm<sup>-2</sup>,盈亏分别为 -96.7 和 -21.3 kg hm<sup>-2</sup>。1992~1996 年的径流小区试验表明,传统耕作方式下的旱坡地花生-绿肥轮作系统中土壤有机碳的年均侵蚀损失量为 164 kg hm<sup>-2</sup>,有机碳的年均形成量为 235 kg hm<sup>-2</sup>,年均矿化量为 313 kg hm<sup>-2</sup>,盈亏为 -242 kg hm<sup>-2</sup>。而对每 hm<sup>2</sup> 产 6 000~6 750kg 的双季稻系统的分析表明,有机碳的年均形成量为 525 kg hm<sup>-2</sup>,年均矿化量为 656 kg hm<sup>-2</sup>,盈亏为 -131 kg hm<sup>-2</sup>。因此,这些利用系统中有机碳平衡的亏缺造成研究区域土壤有机质的普遍下降。由于劳动力成本增加,研究区域 80 年代后期停止种植绿肥(如紫云英),同时秸秆还田量也在减少,因此稻田中有机质循环处于亏缺状况,这是水田土壤有机质减少的原因,但同时由于化肥用量的增加,研究区域水田土壤养分含量提高。

### 3 结论

在典型中亚热带红壤丘陵区,通过分析不同利用系统中养分循环的平衡量,可以预测土壤养分的变化。红壤旱坡地不同的耕作和轮作系统中,土壤全氮和速效钾的变化量与氮、钾的平衡量间显著相关。丘陵红壤在保持荒地和水田利用方式时,土壤 pH、速效磷和速效钾变化不显著,而土壤有机质含量显著降低;旱地方式下,土壤速效磷、钾的含量增加,但不施肥的针阔混交林中土壤速效磷显著减少;荒地开垦为水田后,土壤肥力有增加

趋势。这些变化与不同系统中养分盈亏的变化趋势一致。

致谢 1980年的土壤样品由吴锡军和刘崇群采集分析, 采样点图由陈志诚绘制, 在此表示感谢。

### 参 考 文 献

1. Jenkinson D S, Hart P B S, Rayner J H. Modelling the turnover of organic matter in long-term experiments at Rothamsted. *Intercol. Bull.*, 1987, 15: 1~ 8
2. 林葆, 林继雄, 李家康. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化. 北京: 中国农业科技出版社, 1996. 1~ 179
3. 吴益伟, 傅庆林, 孟赐福, 等. 低丘红壤四种方式土壤养分平衡和消长研究. *土壤通报*, 1995, 26(4): 165~ 167
4. 曾希柏, 刘国栋, 苍荣, 等. 湘南红壤地区土壤肥力现状及其退化原因. *土壤通报*, 1999, 30(2): 60~ 63
5. 张桃林, 孙波, 赵其国. 中国南方花岗岩丘陵区土壤肥力的变化特征与恢复途径. *地理科学进展*, 1998, 17(增刊): 98~ 105
6. 祝华明, 王美琴, 姚永金, 等. 浙西河谷平原稻田长期肥力演变及提高对策. *土壤通报*, 1997, 28(4): 149~ 152
7. 李辉信, 胡峰, 徐盛荣. 红壤丘陵区不同农业利用和管理方式对土壤肥力的影响. *土壤通报*, 1996, 27(3): 114~ 116
8. 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国中亚热带缓丘区红粘土红壤肥力的演化II. 化学和生物学肥力的演化. *土壤学报*, 1999, 37(2): 203~ 216
9. 王效举, 龚子同. 红壤丘陵小区域不同利用方式下土壤变化的评价和预测. *土壤学报*, 1998, 35(1): 135~ 139
10. 鲁如坤, 时正元, 钱承梁, 等. 中亚热带低丘红壤农田生态系统养分平衡特征研究II 农田养分平衡. 见: 中国科学院红壤生态实验站编. *红壤生态系统研究(第四集)*. 南昌: 江西科学技术出版社, 1998. 64~ 71
11. 中国科学院南京土壤研究所编. *土壤理化分析*. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 1~ 283
12. He Y Q, Li Z M. Nutrient cycling and balance in red soil agroecosystem and their management. *Pedosphere*, 2000, 10: 107~ 116
13. 赵其国等著. *我国东部红壤区土壤退化的时空变化、机理及调控对策*. 北京: 科学出版社, 2001

## CHANGES OF RED SOIL FERTILITY AND ITS PREDICTION DURING THE LAND-USE AND CULTIVATION IN LOW HILL REGION

Sun Bo Wang Xing-xiang Zhang Tao-lin

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

### Summary

The effect of cultivation and management on changes of soil fertility was investigated with pointing sampling at different periods at small catchment scale combined with long-term field experiment in a low hilly red soil region in subtropical China. The key driving force for changes of soil fertility was analyzed, and the correlation models were set up between the changes of soil nutrients and the nutrient balance of various land use systems. The results showed that changes of soil nutrient contents coincide with that for nutrient balances. Soil organic matter content decreased in wastelands and paddy fields; soil available P and K contents increased when changing the wasteland into upland but decreased into mixed-forest land; and soil nutrient contents trend to rising after changing into paddy field. The changes of soil total N and available K correlated significantly with the balance of N and K in slopping upland systems. However, correlation appeared unmarkedly between soil available P and P balance, which was caused possibly by excluding soil fixation and decomposition processes in the calculation of P balance.

**Key words** Low hill region, Red soil, Fertility, Change, Prediction