

我国华南地区不同利用条件下土壤演变对障碍因子的影响^①

苏晓燕^{1,2}, 黄 标^{2*}, 王 虹², 赵永存², 胡文友², 孙维侠², 杨 浩¹

(1 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046; 2 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008)

摘 要: 华南地区不同土壤利用条件下土壤性质演变和障碍因子的识别, 对该地区土壤发生过程和管理利用有重要参考价值。本文根据中国土壤系统分类的检索原则, 在收集华南 9 省土种志典型剖面资料的基础上, 确定了系统分类的土壤类型, 并基于此, 研究了不同利用条件下, 土壤性质的演变, 分析了土壤障碍因子及其影响程度。总的来看, 发育在林地条件下的土壤, 粉粒、pH、阳离子交换量(CEC)、盐基饱和度(BS)、速效磷、速效钾都明显低于旱耕地土壤, 有机质、全氮则相反。林地土壤随着风化作用增强, 从雏形土、淋溶土、富铁土到铁铝土, 土壤黏粒含量逐渐增加, 而土壤 pH、CEC、有效 CEC(ECEC)、有机质、全氮、速效磷、速效钾等逐渐降低。对旱耕地而言, 各种土壤性质基本具有与林地土壤性质一致的变化趋势, 但是增加或减少的程度有所不同。结合主成分中土壤性质的组合特征来分析土壤障碍, 结果表明华南地区土壤在不同土壤利用和类型下都存在养分贫瘠化、酸化、黏化、磷和钾供应能力低下的主要障碍因子, 但各障碍因子发生的次序不同, 随着风化作用加强, 土壤黏化成为最主要的障碍因子。因此, 在土壤利用和管理过程中应因土制宜, 根据土壤类型来确定适当的改良措施。

关键词: 利用条件; 性质演变; 土壤类型; 障碍因子

中图分类号: S151; S155.3

我国华南热带、亚热带地区处于季风气候区, 高温多雨, 矿物风化、脱硅富铝和土壤淋溶等作用强烈, 黏粒和次生矿物含量高, 土壤多呈酸性反应, 阳离子交换量(CEC)低, 保肥供肥能力差, 土壤自然肥力不高。另一方面由于土壤利用过度、耕作管理不当等人为因素影响^[1], 会加剧土壤障碍的形成, 如化肥施用不当会导致土壤酸化以及土壤养分的贫瘠化^[2-3]; 长期不合理的开发利用, 会使农业生态系统中养分循环与平衡失调, 加剧土壤养分贫瘠化及肥力衰减过程^[1,4]。如何识别和评价土壤障碍因子, 是消减土壤障碍, 提高土壤生产力水平的前提。

研究表明, 我国华南地区土壤在农业和林业利用过程中, 存在养分贫瘠化、酸化和黏化三大主要障碍^[5-9]。前人对华南地区土壤障碍因子评价开展过相应的研究工作。旱地土壤在不同母质上障碍因子表现程度不同, 土壤酸化和养分贫瘠化都是旱地土壤的显著特点, 只是第四纪红土母质发育的土壤酸化和养分贫瘠化最严重, 而花岗岩和板岩发育的土壤养分贫瘠化较轻微, 石灰岩母质发育的土壤酸化较不明显^[7]; 另一方面土壤障碍因子的发育还与土壤利用方

式有关, 随着植被退化程度的加大, 从阔叶林、混交林、杉木林、桔园、草地到裸露地, 土壤有机质、全氮、速效磷等养分含量依次下降, 质地变化不明显, CEC 变化不稳定^[8]。然而, 在华南地区土壤障碍因子的出现除与这些因素有关外, 还与土壤发生过程密切相关。由于受华南地区特殊生物气候条件和成土时间差异的影响, 形成了处于不同发育阶段的各种土壤类型, 这些类型中土壤障碍因子的出现有何规律也是一个值得研究的问题。

自上世纪八十年代以来, 我国科学家经过努力建立了一套适合我国特点的土壤系统分类体系^[10], 该体系以土壤发生学理论为指导, 具有定量化和标准化的优点, 在华南地区土壤分类中得到了广泛运用^[11-13]。若将该地区土壤按照系统分类原则进行划分, 一方面, 可以了解土壤的发育演变过程, 同时, 可以根据土壤性质分析不同土壤类型障碍因子的发育特点, 从而为有针对性消减土壤障碍, 改善土壤质量提供理论指导。

本文在收集我国华南地区主要省份土种志的基础上, 对原有的发生分类土壤, 根据土壤系统分类原

①基金项目: 科学技术部国家科技支撑计划项目(2006BAD05B02, 2012bad05b05-2)和国家科技基础性工作专项(2008FY110600)资助。

* 通讯作者(bhuang@issas.ac.cn)

作者简介: 苏晓燕(1987—), 女, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要从事土壤资源演变及评价工作。E-mail: suxiaoyan7236@163.com

则重新分类,然后运用统计学方法研究了不同土壤利用和土壤类型下土壤性质的演变,并分析了土壤障碍因子的发育特点。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于我国东部长江以南的广大低山丘陵区,该区属热带、亚热带季风气候区,多年平均温度 $15 \sim 28^{\circ}\text{C}$,多年平均降雨量约 $1\,200 \sim 2\,500\text{ mm}$ ^[12-20]。受季风气候的控制,该区水热季节分布很不平衡,夏季炎热潮湿,冬季温凉干旱,干湿季节明显。由于丰沛的热量和降雨等气候资源,该地区成为我国重要的粮食、经济作物和林果产业基地^[21]。

1.2 资料来源与整理

为了全面了解华南地区土壤性质和土壤障碍因子的发育特点,本文收集了福建、江西、湖南、广东、广西、贵州和云南 7 省土种志^[14-20]和浙江省、海南省土系概论^[12-13]中的土壤典型剖面资料。首先,根据前 7 省土种志中发生分类的砖红壤、赤红壤、红壤和黄壤等典型剖面重新按照中国土壤系统分类原则进行分类,最终划分出铁铝土、富铁土、淋溶土和雏形土 4 个土纲,共 490 个剖面;再加上浙江省和海南省土系概论中已有系统分类的铁铝土、富铁土、淋溶土和雏形土 94 个剖面,最终将收集的 584 个土壤典型剖面理化性质数据建立了数据库。

1.3 数据处理及分析

考虑到收集资料的完整性、指标之间的相关性、土壤障碍评价指标的代表性,最终本文选取了土壤表层粉粒、黏粒、pH、有机质、全氮、速效钾、速效磷、CEC、有效 CEC(ECEC)和盐基饱和度(BS)10 个指标作为分析的基础数据文本。利用统计软件 Excel 2007 和 SPSS11.5 进行描述性统计、差异显著性分析、相关分析、聚类分析和主成分分析等相关统计分析。

2 结果

2.1 华南地区土壤性质的现状

从华南地区土壤质地的类型来看,土壤大部分属于黏土^[22],平均黏粒含量达 275 g/kg (表 1)。土壤大部分呈酸性,平均 pH 值为 5.3,且变异较小(变异系数为 15%),BS 整体较低,平均为 37%,尤其在林地土壤上平均为 28%;其他土壤化学性质,CEC、ECEC 也较低,平均仅 10.6 cmol/kg 和 6.5 cmol/kg ;尽管土壤肥力性质,如有机质、全氮、速效钾平均含量相对较高^[4],但变异系数较大,一般大于 60%;速效磷含量较小,且变异系数较高,甚至高达 153%。

2.2 土壤性质的演变

不同土壤利用和土壤类型之间,土壤物理、化学和养分性质都存在显著的差异(表 1)。发育在林地条件下的土壤,其粉粒含量(245 g/kg)显著低于旱耕地(272 g/kg),而黏粒含量略低于旱耕地,但差异不显著;林地土壤化学性质中 pH(5.0)、CEC(9.6 cmol/kg)、BS(28%)都显著低于旱耕地(5.8、 11.8 cmol/kg 、54%),ECEC 亦略低;对养分性质中的速效磷和速效钾而言,林地土壤(4.0 mg/kg 、 89 mg/kg)都明显低于旱耕地土壤(8.1 mg/kg 、 109 mg/kg),而有机质和全氮则前者(34 g/kg 、 1.6 g/kg)显著高于后者(27 g/kg 、 1.3 g/kg)。

无论林地还是旱耕地,随着成土和风化作用增强,从雏形土、淋溶土、富铁土到铁铝土土纲,土壤物理、化学和养分性质存在着一定的演变规律(表 1)。林地土壤黏粒含量随着成土作用的加强逐渐增加,从雏形土的 219 g/kg 增加到铁铝土的 369 g/kg ,且铁铝土黏粒含量显著高于富铁土、淋溶土和雏形土(表 1),粉粒则相反,从 230 g/kg 降低到 178 g/kg ,但仅铁铝土达到显著性降低;土壤 pH、CEC、ECEC 随着风化作用的加强亦逐渐降低,其值分别从雏形土的 5.2、 12.2 cmol/kg 、 6.9 cmol/kg 降至铁铝土的 4.7、 6.1 cmol/kg 、 3.5 cmol/kg ,BS 没有显著的演变规律;养分性质,如有机质、全氮、速效磷、速效钾等也呈逐渐降低趋势,从雏形土至铁铝土,土壤有机质平均从 36 g/kg 降至 27 g/kg ,全氮从 2.0 g/kg 降至 1.2 g/kg ,速效磷从 5.1 mg/kg 降至 2.9 mg/kg ,速效钾从 91 mg/kg 降至 63 mg/kg 。

旱耕地各种土壤性质基本具有与林地土壤性质一致的变化趋势,但是其增加或减少的程度有所不同,只有土壤黏粒含量、pH、CEC 等性质在铁铝土上达到显著性增加或降低(表 1)。

2.3 不同土壤类型中土壤障碍因子分析

2.3.1 土壤中障碍因子类型分析 为了了解土壤中各种性质之间的相关性和组合特征,本文将所有土壤利用和类型的土壤基本性质合并在一起,进行了聚类分析,其结果如图 1 所示。如果以聚类距离 20 为界,这些土壤性质可分为 5 个组合类型。第一类包括土壤有机质、全氮、CEC 和 ECEC,显然这是土壤肥力的表征;第二类仅包括土壤速效钾,表征了土壤钾的供应能力;第三类包括土壤粉粒和黏粒含量,是土壤的物理性质的表征;第四类包括土壤 pH 和 BS,是土壤酸碱性的表征;第五类仅包括土壤速效磷,表征了土壤磷素的供应能力;这些组合特征,基本表征了所研究土壤中可能存在的土壤限制因子或障碍因子。

表 1 华南地区不同土壤利用和土壤类型的主要物理、化学、养分性质
Table 1 Main physical, chemical, fertility properties of different soil uses and soil types in south China

土壤	土纲 (n)	物理性质		化学性质				养分性质			
		粉粒 (g/kg)	黏粒 (g/kg)	pH	CEC (cmol/kg)	ECEC (cmol/kg)	BS (%)	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
林地	铁铝土 (24)	178 ± 111 b	369 ± 149 a	4.7 ± 0.4 b	6.1 ± 2.4 b	3.5 ± 1.6 b	31 ± 18 a	27 ± 14 b	1.2 ± 0.5 b	2.9 ± 3.0 b	63 ± 37 b
	富铁土 (146)	249 ± 107 a	302 ± 113 b	4.9 ± 0.5 ab	8.2 ± 4.1 b	6.0 ± 2.4 a	26 ± 19 a	31 ± 19 b	1.4 ± 0.9 b	3.7 ± 5.0 ab	85 ± 48 a
	淋溶土 (94)	267 ± 146 a	232 ± 102 c	5.1 ± 0.5 a	11.2 ± 6.4 a	7.0 ± 3.5 a	30 ± 26 a	40 ± 28 a	1.7 ± 0.8 ab	4.0 ± 4.1 ab	101 ± 60 a
	雏形土 (66)	230 ± 114 a	219 ± 116 c	5.2 ± 0.8 a	12.2 ± 6.6 a	6.9 ± 4.5 a	30 ± 22 a	36 ± 24 ab	2.0 ± 2.7 a	5.1 ± 6.8 a	91 ± 52 a
	小计 (330)	245 ± 123 B	270 ± 122 A	5.0 ± 0.6 B	9.6 ± 5.6 B	6.1 ± 3.2 A	28 ± 21 B	34 ± 23 A	1.6 ± 1.4 A	4.0 ± 5.1 B	89 ± 53 B
	合计 (584)	257 ± 119	275 ± 128	5.3 ± 0.8	10.6 ± 6.5	6.5 ± 4.2	37 ± 26	31 ± 21	1.5 ± 1.2	5.8 ± 8.9	98 ± 65
旱地	铁铝土 (9)	260 ± 76 a	428 ± 208 a	5.1 ± 0.5 b	7.1 ± 4.4 b	4.5 ± 4.0 a	48 ± 38 a	25 ± 11 a	1.2 ± 0.5 a	6.6 ± 9.2 a	89 ± 63 a
	富铁土 (83)	267 ± 110 a	317 ± 147 b	5.6 ± 0.8 a	9.9 ± 7.1 ab	6.1 ± 3.9 a	53 ± 27 a	26 ± 17 a	1.2 ± 0.6 a	6.9 ± 9.0 a	95 ± 76 a
	淋溶土 (105)	274 ± 118 a	244 ± 113 b	5.9 ± 0.8 a	13.0 ± 6.6 a	7.8 ± 4.5 a	55 ± 27 a	28 ± 17 a	1.4 ± 0.7 a	8.4 ± 13.3 a	120 ± 81 a
	雏形土 (57)	278 ± 113 a	276 ± 111 b	5.8 ± 0.7 a	13.8 ± 8.0 a	10.2 ± 10.7 a	54 ± 23 a	26 ± 15 a	1.3 ± 0.6 a	9.5 ± 12.5 a	110 ± 64 a
	小计 (254)	272 ± 112 A	281 ± 135 A	5.8 ± 0.8 A	11.8 ± 7.3 A	7.4 ± 6.1 A	54 ± 27 A	27 ± 16 B	1.3 ± 0.7 B	8.1 ± 11.7 A	109 ± 76 A
	合计 (584)	257 ± 119	275 ± 128	5.3 ± 0.8	10.6 ± 6.5	6.5 ± 4.2	37 ± 26	31 ± 21	1.5 ± 1.2	5.8 ± 8.9	98 ± 65

注：同一土壤利用条件下，同列中不同小写字母表示不同土壤类型在 $P<0.05$ 水平上差异显著；同列不同大写字母表示不同土壤利用在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

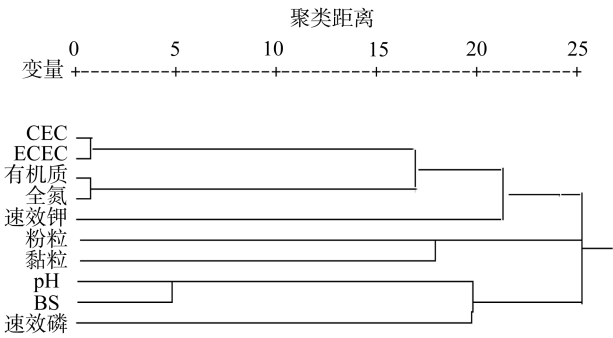


图 1 华南地区林地和旱地土壤基本性质聚类分析枝状图
Fig. 1 Cluster analysis of soil basic properties in woodlands and unirrigated farmlands in south China

与聚类分析一样,主成分分析是将多个指标转化为少数几个互相无关的主成分的一种多元统计分析方法^[22],将各种土壤性质通过主成分分析转化为几个综合的主成分,可分析其反映的障碍类型,但与聚类分析不同的是,主成分分析还可以从主成分对整个研究对象的贡献率大小来确定土壤障碍类型的影响程度。本文尝试将此方法运用到土壤障碍因子分析中。

由于土壤类型间存在明显的演变趋势,另一方面,尽管不同土壤类型间性质的演变,在不同利用条件下,具有相似的规律,但土壤利用的变化对其影响

还是较为明显的,因此,亦有可能会影响到土壤中障碍因子发生的类型和次序。为了更清晰地了解各类土壤中土壤障碍发生的特点,本文将按不同土壤利用和土壤类型组合条件分别讨论。

2.3.2 林地条件下不同土壤类型中土壤障碍因子分析 将所有林地条件下的土壤表层样品性质数据按不同土壤类型分别进行主成分分析(表 2),列出特征值大于 1 时的所有主成分,每个土壤类型中的累积贡献率都超过了 65%,铁铝土纲已高达 82%。可以说,分析结果能基本反映华南地区土壤演变过程的全貌。现根据其主成分权系数的大小及指标组合,从土壤发生观点出发,结合上述聚类分析结果,分析各自反映的障碍因子类型。

铁铝土第一主成分(Y_1)的正向权系数较高的指标为粉粒、黏粒和 CEC,显然这是土壤黏化障碍的度量。这些组分含量越高,土壤黏化越严重。第二主成分(Y_2)正向权系数较高的指标为有机质、全氮和速效钾,是土壤肥力障碍的度量,有机质、全氮和速效钾含量愈低,土壤贫瘠化越强烈。第三主成分(Y_3)的正向指标为 pH 和 BS,其土壤障碍意义显然是土壤酸化过程的表现。第四主成分(Y_4)的正向指标是 ECEC,负向指标为速效磷,其含义是土壤磷素供应能力的限制。

按照以上类似的分析,富铁土第一主成分是土壤肥力障碍的度量。第二主成分是土壤黏化障碍的度量。第三主成分是土壤酸化障碍的度量,但伴随着土壤钾素对土壤利用的限制。第四主成分也是土壤磷素供应能力障碍的度量,与铁铝土一样。

类似地,淋溶土第一主成分是土壤酸化障碍的度量。第二主成分明显是土壤肥力障碍的度量。第三和第四主成分是土壤黏化障碍,同时伴随着土壤磷素和钾素供应能力的障碍。

雏形土共获得 3 个主成分,分别清楚地反映了土壤黏化、土壤肥力、土壤酸化的障碍,与其他土壤类型不同,土壤磷素和钾素供应能力的障碍未单独表现出来,而是与土壤有机质和全氮组合在一起。

2.3.3 旱耕地条件下不同土壤类型中障碍因子分析
旱耕地条件下,铁铝土、富铁土、淋溶土和雏形

土的特征值大于 1 时,其累积贡献率都大于 70%(表 3),铁铝土主成分分析中 3 个主成分的累积贡献率就达到近 100%。应该说,通过主成分分析获得的主成分反映出的土壤障碍类型,对研究区土壤限制因子的反映更明确。

旱耕地铁铝土第一主成分反映障碍类型并不是特别清楚,一方面正向指标有反映土壤肥力障碍的有机质、全氮、CEC 和黏粒含量,另一方面还出现了包括粉粒和 BS 的负向指标。总体是土壤肥力和土壤黏化的度量,但是也有可能存在其他因素的影响。第二主成分是土壤酸化的度量。第三主成分是土壤磷和钾素供应能力的度量。与林地土壤中的铁铝土相比,障碍因子出现的次序较为相似,土壤黏化和肥力障碍的贡献率要明显高,土壤磷素和钾素供应能力因子出现在同一个主成分上。

表 2 华南地区林地土壤各土纲基本性质的主成分(Y)分析结果
Table 2 Principal component analyses of soil properties of various soil groups in forestlands in south China

主成分分析		铁铝土				富铁土			
		Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
统计参数	特征值	2.46	2.15	2.07	1.55	1.80	1.78	1.55	1.39
	累积贡献率	24.63	46.16	66.82	82.35	17.97	35.75	51.24	65.16
主成分权系数	粉粒	0.748	0.286	0.125	0.414	-0.104	0.164	0.053	0.744
	黏粒	0.762	0.134	-0.294	0.364	-0.447	0.570	0.107	0.003
	有机质	0.285	0.890	-0.094	-0.04	0.877	0.170	-0.120	-0.120
	全氮	0.457	0.837	-0.094	0.086	0.748	0.094	0.098	0.175
	速效磷	-0.050	0.231	0.464	-0.701	0.184	-0.027	0.069	0.745
	速效钾	-0.554	0.637	0.315	0.022	0.320	0.168	0.573	-0.375
	pH	-0.046	-0.036	0.916	-0.154	-0.112	0.105	0.718	0.170
	CEC	0.804	0.29	-0.197	-0.13	0.182	0.852	0.078	-0.049
	ECEC	0.145	0.115	0.109	0.835	0.277	0.785	-0.057	0.253
	BS	-0.231	0.046	0.861	0.100	-0.024	-0.082	0.808	0.059
主成分分析		淋溶土				雏形土			
		Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₁	Y ₂	Y ₃	
统计参数	特征值	2.29	2.09	1.81	1.33	3.33	1.86	1.78	
	累积贡献率	22.91	43.78	61.93	75.23	33.34	51.91	69.70	
主成分权系数	粉粒	0.105	0.207	0.125	0.838	0.850	-0.010	-0.158	
	黏粒	0.192	0.224	-0.685	0.337	0.892	0.131	-0.199	
	有机质	-0.467	0.598	0.500	-0.072	0.388	0.758	-0.149	
	全氮	-0.514	0.493	0.546	-0.134	0.443	0.566	-0.365	
	速效磷	0.134	0.115	0.817	0.203	-0.201	0.508	0.373	
	速效钾	0.264	0.181	0.192	-0.575	0.083	0.781	0.148	
	pH	0.891	-0.063	-0.091	-0.242	0.079	-0.001	0.828	
	CEC	-0.086	0.820	-0.198	-0.067	0.768	0.245	0.148	
	ECEC	0.073	0.820	0.171	0.212	0.908	0.109	0.192	
	BS	0.931	-0.012	0.040	0.105	-0.040	0.066	0.808	

注：加粗的数字表示主成分权系数较高，下同。

旱耕地富铁土第一和第二主成分均是土壤肥力障碍的度量,其正向权系数较高的指标分别是有机质和全氮、CEC 和 ECEC。第三主成分是土壤黏化障碍的度量,并伴随着土壤磷素和钾素的影响,且土壤速效钾和速效磷的权系数互为正负,表明土壤黏化作用的加强可能会提高钾素的供应能力,但同时又会降低磷素的供应能力。第四主成分则是土壤酸化的度量,与林地土壤的主成分分析结果相比,出现次序大致类似,只是磷钾素供应能力的障碍没有单独显示出来。

旱耕地淋溶土主成分表达的意义较为清楚,第一、二、三主成分分别是土壤黏化障碍、土壤肥力障碍、土壤酸化障碍的度量(表 3)。与林地土壤的淋溶土所表达的障碍类型出现的顺序完全不同,且土壤钾素供应能力的信息与土壤肥力障碍的主成分结合在

一起。

旱耕地雏形土几个主成分反映的土壤障碍过程也与林地土壤有所不同,第一和第二主成分的含义与土壤肥力和保肥能力相关。第三主成分是土壤酸化的度量,但较高权系数的指标中未出现 BS,而反映土壤供钾能力的速效钾在这一主成分中权系数较高。第四主成分是土壤黏化的度量。

3 讨论

3.1 采用土壤系统分类分析土壤性质可充分反映土壤发生和障碍形成过程

中国土壤系统分类的一个突出特点,是以土壤发生学理论为指导,在建立土壤诊断层和诊断特性的基础上,对土壤进行定量分类^[24]。对热带、亚热带高

表 3 华南地区旱耕地土壤各土纲基本性质的主成分(Y)分析结果
Table 3 Principal component analyses of soil properties of various soil groups in dry farmlands in south China

主成分分析		铁铝土			富铁土			
		Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
统计参数	特征值	6.01	2.55	1.44	2.14	2.04	1.79	1.44
	累积贡献率	60.10	85.58	100	21.38	41.79	59.69	74.10
主成分权系数	粉粒	-0.987	-0.158	0.016	0.423	-0.206	0.688	-0.012
	黏粒	0.978	0.207	-0.031	-0.039	0.480	0.703	0.119
	有机质	0.943	0.329	0.052	0.957	0.149	-0.045	0.074
	全氮	0.827	0.558	0.065	0.917	0.114	0.127	0.108
	速效磷	0.598	0.439	0.670	-0.291	-0.186	-0.569	0.013
	速效钾	-0.217	-0.345	0.913	-0.257	-0.014	0.613	0.022
	pH	-0.076	0.973	-0.216	0.087	-0.136	0.238	0.790
	CEC	0.960	-0.014	-0.281	0.080	0.928	0.008	-0.124
	ECEC	0.446	0.895	0.012	0.180	0.891	0.139	0.143
	BS	-0.987	-0.021	-0.158	0.066	0.158	-0.170	0.865
主成分分析		淋溶土			雏形土			
		Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
统计参数	特征值	2.48	2.32	2.22	2.46	2.37	1.97	1.81
	累积贡献率	24.81	47.96	70.17	24.63	48.37	68.03	86.15
主成分权系数	粉粒	0.925	0.002	0.052	-0.062	-0.013	0.045	0.944
	粘粒	0.867	0.134	-0.094	-0.05	-0.002	-0.443	0.791
	有机质	0.186	0.758	-0.487	0.343	0.847	0.240	0.171
	全氮	0.345	0.798	-0.405	0.053	0.968	0.117	0.057
	速效磷	0.028	0.370	0.157	-0.023	0.720	0.016	-0.184
	速效钾	0.015	0.583	0.029	0.085	0.246	0.890	0.010
	pH	-0.073	0.002	0.866	0.109	0.047	0.885	-0.213
	CEC	0.632	0.424	-0.293	0.881	0.316	0.019	-0.228
	ECEC	0.562	0.654	0.297	0.981	0.098	0.025	-0.116
	BS	0.003	0.041	0.926	0.760	-0.166	0.349	0.343

度风化的土壤而言,在建立的铁铝层和低活性富铁层中强调黏粒阳离子交换量作为重要的诊断指标^[10],显然,该指标是该地区土壤发生过程变化较为敏感的诊断指标之一。从本文获得的雏形土、淋溶土、富铁土和铁铝土 4 个土纲主要理化和养分性质的演变规律可看出,随着风化作用加剧,土壤黏粒含量增加,化学性质如 pH、CEC、ECEC 显著降低,另一方面,土壤养分含量及其有效性也呈显著性降低(表 1)。该规律清楚地反映了华南地区盐基淋溶、黏化、酸化等土壤发育过程^[2, 5, 25],同时,还获得了热带地区磷素和钾素供应能力影响的形成过程。可见该分类系统既可以保证土壤分类的定量化,又能充分反映土壤的发生过程。在这样的分类基础上,定量研究土壤障碍类型的发生特点,科学性强,对农业生产中因土改良或因土种植具有很强的针对性。

3.2 自然条件下随着风化作用的增强,障碍因子的重要性不同

图 2 总结了林地条件下各种土壤类型中障碍因子重要性的排序,可看出,自淋溶土开始,随着风化作用的增强,黏化作用在土壤中的重要性越来越凸显出来,土壤贫瘠障碍重要性相对较重要,而酸化作用的重要性逐渐降低,且随着风化作用的增强,在淋溶土、富铁土和铁铝土中除了出现通常的土壤障碍因子外,土壤磷素和钾素供应能力的障碍从养分贫瘠障碍中分离出来,成为独立的一个因子。

这些演变规律从理论上讲,应该是合理的。首先,随着脱硅富铝化作用的增强,土壤黏土矿物主要以高岭石、铁铝氧化物为主^[25-26],这些矿物颗粒极细,极易凝聚,导致土壤物理状况不佳,再加上,有机质随着风化作用加强逐渐降低(表 1),导致其重要性凸显

出来。至于,土壤磷素供应能力,显然也是与此有关,一方面,风化作用使大量磷素流失,另一方面,氧化铁铝对磷素有较强的吸附固定作用^[27],使得磷素的供应能力成为一个独立的限制因素。由于华南地区土壤 CEC 小,且盐离子代换量中主要是 Al^{3+} ,抑制了钾的吸附或促进了钾离子的解吸,再加上钾离子的吸附量明显随土壤 pH 降低而减小,使钾不易进入复合体而大部分存留在土壤溶液而易淋失^[28],使得钾素的供应能力成为一个独立的限制因素。通常土壤有机质和全氮是土壤肥力的重要指标^[23, 30],它们反映的土壤贫瘠障碍始终是较为重要的因素,这是不言而喻的。土壤酸化在淋溶土上重要性凸显,可能是与该土壤其他障碍因素影响相对较弱而导致的。至于雏形土,可能由于发育较弱,受其他各种因素影响较明显,障碍因子出现次序与上述演变规律不一致,同时,磷和钾供应能力的限制因素也未单独出来。

3.3 人为作用对风化相对较弱土壤中障碍类型的影响较明显

大量研究表明^[28],人类活动可以改变土壤性质的变化方向,本文的结果也正说明这一点。由于人为耕作、施肥等措施的影响,导致土壤有机质、全氮的降低(表 1),而土壤 CEC、BS、速效钾和速效磷明显增加。且在旱耕地上土壤有机质、全氮、速效钾和速效磷等性质,从弱风化的雏形土到强风化的铁铝土,尽管有一定演变趋势,但没有统计学意义(表 1)。尽管这样,旱耕地土壤中,在高度风化的铁铝土和富铁土上,土壤障碍因子出现的顺序还是与林地利用条件下的铁铝土和富铁土类似(表 2~3),表明在高度风化条件下,土壤障碍因子的影响,在很大程度上仍受生物气候条件制约,人为作用难以改变土壤障碍因子的

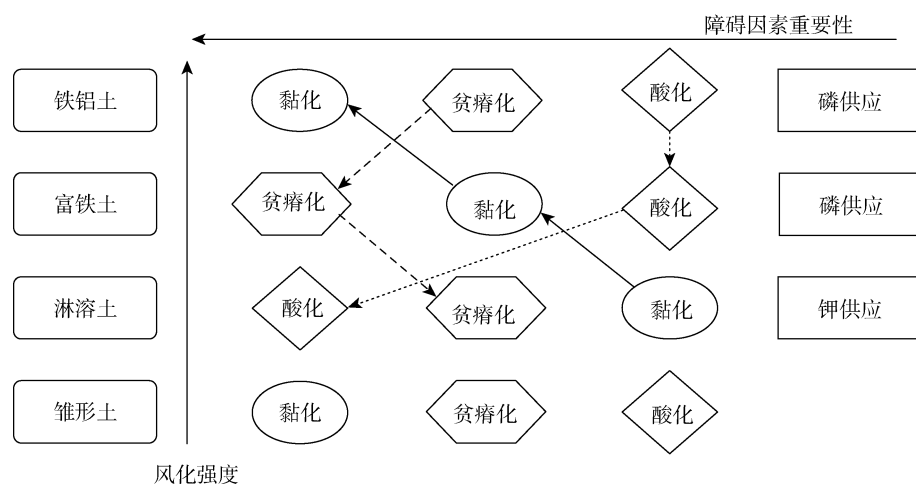


图 2 热带、亚热带土壤风化强度与障碍因素重要性的关系

Fig. 2 Relationship between the intensity of soil weathering and the importance of soil factors in the tropic and subtropic zones

影响。相对地, 中度或弱度风化的淋溶土和雏形土障碍类型发生了变化, 淋溶土最主要的障碍因子由酸化变为了黏化, 而雏形土最主要的障碍因子由黏化转变为养分贫瘠化。

4 结论

本文的研究表明, 土壤系统分类除能够很好地定量划分不同风化阶段的土壤类型外, 还能很好地体现华南地区土壤的发生演变过程。随着风化程度的加强, 从雏形土、淋溶土、富铁土至铁铝土, 富铁铝化过程加强, 盐基淋失, 酸性增强, 土壤养分含量都随之减少, 特别是土壤养分的有效性降低, 而土壤黏粒含量增加。在这些发生演变条件下, 从淋溶土开始, 至富铁土、铁铝土, 随着风化作用增强, 黏化障碍越来越凸显, 酸化障碍的影响反而减弱。土壤除普遍存在黏化、贫瘠化和酸化等障碍因素外, 在风化作用较强的情况下, 还特别凸显出了该地区磷素和钾素供应能力的障碍。这样, 将华南地区土壤的发生演变与土壤利用过程中障碍因子的出现紧密地联系了起来, 不仅扩大了土壤分类的应用, 而且明确了不同土壤类型的障碍因子。这可以为华南地区土壤障碍因子及改良区划提供基础资料, 同时, 在农林业生产中, 可为因土制宜, 有针对性消除土壤障碍提供参考。

参考文献:

- [1] 赵其国. 我国红壤的退化问题[J]. 土壤, 1995, 27(6): 281-285
- [2] 曾希柏. 红壤酸化及其防治[J]. 土壤通报, 2000, 31(3): 111-114
- [3] 刘杰, 张杨珠. 红壤地区土壤退化及恢复重建研究(I)[J]. 湖南农业科学, 2009(4): 44-51
- [4] 孙波, 张桃林, 赵其国. 南方红壤丘陵区土壤养分贫瘠化的综合评价[J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 119-128
- [5] 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 I[J]. 土壤学报, 1999, 36(1): 35-47
- [6] 许中坚, 刘广深, 刘维屏. 人为因素诱导下的红壤酸化机制及其防治[J]. 农业环境保护, 2002, 21(2): 175-178
- [7] 曾希柏, 李菊梅, 徐明岗, 高菊生, 孙楠. 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
- [8] 陈永强, 俞劲炎. 不同利用方式下红壤内在性质的演化[J]. 土壤通报, 2004, 35(2): 149-151
- [9] 蔡泽江, 孙楠, 王伯仁, 徐明岗, 黄晶, 张会民. 长期施肥对红壤 pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 71-78
- [10] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索[M]. 3 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001: 89-90
- [11] 王庆云, 徐能海. 湖北省土系概要[M]. 武汉: 湖北科技出版社, 1997
- [12] 章明奎, 魏孝孚, 厉仁安. 浙江省土系概论[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000
- [13] 龚子同, 张甘霖, 漆智平. 海南岛土系概论[M]. 北京: 科学出版社, 2004
- [14] 福建省土壤普查办公室. 福建土种志[M]. 福建: 福建科学技术出版社, 1991
- [15] 江西省土地利用管理局, 江西省土壤普查办公室. 江西土种[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1991
- [16] 湖南省农业厅. 湖南土种志. 湖南: 湖南省农业厅, 1987
- [17] 广东省土壤普查办公室. 广东土种志[M]. 北京: 科学出版社, 1996
- [18] 广西土壤肥料工作站. 广西土种志[M]. 广西: 广西科学技术出版社, 1993
- [19] 贵州省土壤普查办公室. 贵州土种志[M]. 贵州: 贵州科技出版社, 1994
- [20] 云南省土壤普查办公室. 云南土种志[M]. 云南: 云南科技出版社, 1994
- [21] 崔健, 周静, 马友华, 何圆球. 我国红壤旱地氮素平衡特征[J]. 土壤, 2008, 40(3): 372-376
- [22] 朱鹤健, 何宜庚. 土壤地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 50-77
- [23] 陈永强, 吕军, 柳云龙. 侵蚀红壤肥力退化评价指标体系研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 72-76
- [24] 龚子同, 陈志诚, 赵文君, 石华. 我国土壤系统分类中富铁铝土壤的分类[J]. 土壤与环境, 2000, 9(2): 149-153
- [25] 龚子同, 张甘霖, 陈志诚. 土壤发生与系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2007
- [26] Tawornpruek S, Kheoruenromne I, Suddipproham A, Gilkes RJ. Properties of red oxisols on calcareous sedimentary rocks in Thailand[J]. Geoderma, 2006, 136: 477-493
- [27] 黄中子, 吴晓芙, 赵芳, 芦鹏. 红壤对磷的吸附特性及其影响因素研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(21): 91-94
- [28] 南方红壤退化机制与防治措施研究专题组. 中国红壤退化机制与防治[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999
- [29] 龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 骆国保, 赵文君. 以中国土壤系统分类为基础的土壤参比[J]. 土壤通报, 2002, 33(1): 1-5
- [30] 张同娟, 杨劲松, 刘广明, 杨奇勇. 长江河口地区土壤肥力质量综合评价研究[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 513-517
- [31] 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [32] 鲁如坤, 时正元. 退化红壤肥力障碍特征及重建措施(I)[J]. 土壤, 2000, 32(4): 198-201
- [33] 鲁如坤, 时正元. 退化红壤肥力障碍特征及重建措施(II)[J]. 土壤, 2000, 32(6): 310-314
- [34] 鲁如坤, 时正元. 退化红壤肥力障碍特征及重建措施(III)[J]. 土壤, 2001, 32(5): 227-232
- [35] 曹志洪, 周健民. 中国土壤质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008

- [36] 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 [J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 203-217
- [37] 任若恩, 王惠文. 多元统计数据分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997
- [38] 李忠佩, 唐永良, 石华, 张桃林. 不同轮作措施下瘠薄红壤中碳氮积累特征[J]. 中国农业科学, 2002, 35(10): 1 236-1 242
- [39] 章爱群, 贺立源, 赵会娥, 郭再华, 崔雪梅. 有机酸对土壤无机态磷转化和速效磷的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4 061-4 069
- [40] 丛日环, 李小坤, 鲁剑巍. 土壤钾素转化的影响因素及其研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2007, 26(6): 907-913
- [41] 谢建昌, 周健民. 我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展[J]. 土壤, 1999, 31(5): 244-254

Evolution of Soil Properties and Soil Limitation Factors in Different Soil Use and Genetic Conditions in South China

SU Xiao-yan^{1, 2}, HUANG Biao^{2*}, WANG Hong², ZHAO Yong-cun²,
HU Wen-you², SUN Wei-xia², YANG Hao¹

(1 School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation of Chinese Academy of Sciences, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The evolution of soil properties and identification of soil limitation factors under various soil use conditions in south China are important for the process of soil genesis and land use management. This paper determined soil classification with typical soil profiles in nine provinces in south China on the basis of Chinese soil taxonomy, evaluated the evolution of soil properties in terms of weathering intensity, and analyzed soil limitation factors influencing soil productivity. Generally, the soil properties such as silt content, pH, cation exchangeable capacity (CEC), base saturation (BS), available phosphorus and available potassium developed in forestlands were lower than those in dry farmlands, while organic matter and total nitrogen were opposite. With the strengthen of soil weathering, from Cambosols, Argosols, Ferrosols to Ferralosols, soil clay content was gradually increased, on the contrary, soil properties such as soil pH, CEC, effective CEC (ECEC), organic matter, total nitrogen, available phosphorus, and available potassium were gradually decreased. Although soil properties in dry farmlands had the same variation tendency as in those in forestlands, their variation were weak. The results of principal component analysis showed that the soil had main limitation factors as malnutrition, acidification, argillification, and low phosphorus and potassium availability for soil uses. The importance of the limitation factors was different in different soil uses and soil types and soil argillification became the most main limitation factor with soil weathering. So, establishment on suitable ameliorative measures would be based on the conditions of soil uses and types when the soils are used and managed.

Key words: Soil uses, Evolution of soil properties, Soil types, Limitation factors