

# 热带土壤发育过程的定量研究——以海南岛北部为例

黄成敏<sup>1</sup>, 龚子同<sup>2</sup>

(1. 四川大学环境学院, 四川成都 610065; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 210008)

**摘要:** 海南岛北部不同时期喷发的玄武岩上发育的土壤构成一个成土年代系列, 由此可以定量地探讨发育过程中土壤性质随风化成土年龄增加的变化规律. 研究表明土体厚度、B层厚度、RR指数、 $w(\text{REE})$ 、 $w(\text{Ba})/w(\text{Nb})$ 、 $w(\text{Fe}_d)/w(\text{Fe}_t)$ 、 $w(\text{Fe}_d)/w(\text{Fe}_o)$ 、土壤硅铝率、土壤硅铁铝率、频率磁化率等土壤性质与风化成土年龄具有确定的相应关系. 根据土壤发生学原则, 得出土壤性质与风化成土年龄两者间的统计方程. 对于成土环境相同或相近地区可从这些方程由土壤性质推断相对风化成土年龄和发育程度, 也可由风化成土年龄估计土壤特性, 研究成土速率.

**关键词:** 玄武岩; 土壤发育; 成土年龄; 定量研究.

**中图分类号:** S151.1      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2383(2001)03-0315-07

**作者简介:** 黄成敏(1968), 男, 副教授, 1999年在中国科学院南京土壤研究所获博士学位, 现从事环境地质方面的教学与科研工作.

土壤形成受5大成土因素控制, 其中地质体、生物、气候和地形通过时间作用和影响土壤的发生和发育<sup>[1]</sup>. 当地质体等4因素处于相同或相近的状况或条件时, 土壤性质的变化就成为时间的函数, 构成一个土壤成土年代系列<sup>[1,2]</sup>. Walker<sup>[3]</sup>进一步阐述到“如果测定准确的土壤年龄, 就可获取土壤性质变化的速率方程, 构成成土年龄函数系列; 如果不知确定的土壤年龄而只知土壤形成的先后, 可探讨某些成土过程及其机理, 但不是速率, 构成成土年代系列”. 通常将两种系列通称为(广义的)成土年代系列.

定量探讨时间对土壤形成和发育的影响, 即建立土壤发育模型, 研究成土速率看似简单而实际是极为复杂的问题<sup>[4]</sup>. 这激起土壤学家极大的兴趣, 也发表了不少研究成果<sup>[5,6]</sup>. 这些成果集中在美国和欧洲温带地区以及澳大利亚部分地区的河流冲积物、海相和河、湖沉积物、沙丘和冰积物等松散母质发育的土壤<sup>[5,7]</sup>. 相比之下, 对于固结母质或基岩上发育土壤的成土速率报道较少<sup>[7]</sup>, 而有关热带地区基岩上土壤成土年代系列的研究更少<sup>[5,6,8~10]</sup>. 其最主要的原因在于获得土壤发育的起始时间困难<sup>[7]</sup>. 同时土壤成土年代系列的研究一般集中于某些或部

分土壤性质随成土时间的变化, 而从土壤性质的不同角度进行全面探讨则十分罕见<sup>[5,6]</sup>.

## 1 研究区的选择

定量研究成土速率, 建立土壤性质随时间变化的模型, 目前普遍存在以下几个难点<sup>[4,6]</sup>: (1) 样本少. 通常时间系列只有4至6个样点, 有时少至2或3个<sup>[4]</sup>. 因而要求选取具有相同成因的样点, 如海积阶地系列等; (2) 样点间土壤性质的空间变异性. 克服的方法是尽可能将土壤样点之间的其他成土因素差异缩小至最少, 如选择相距近的采样点等; (3) 土壤多元发生. 由于受冰期和间冰期影响, 气候出现波动, 可能导致土壤性质的变化, 成土年龄愈大, 土壤多元发生的可能性也越大.

地处我国南端的海南岛北部集中分布有新生代以来不同时期喷发的玄武岩. 多期喷发的玄武岩, 主要以拉斑玄武岩为主, 类型较均一, 气候和地形差异小, 因而不同时期喷发的玄武岩上发育的土壤构成一个良好的成土年代从老至新的土壤系列.

同时, 琼北地处热带, 虽会受到气候变化的影响<sup>[11,12]</sup>, 但波动幅度较小<sup>[13]</sup>. 黄镇国等<sup>[14]</sup>研究表明自早更新世直至晚更新世早中期, 琼北一直位于热

带范围,有利于强风化红土的发育;至晚更新世晚期即玉木冰期盛期(18 900~16 720 a),热带界线退到 $19^{\circ}\text{N}$ ,也就是说琼北( $19^{\circ}40'\sim 20^{\circ}10'\text{N}$ )处在亚热带南部。至全新世,琼北地区气候转暖,与现在气候相当。且在早更新世晚期气候最暖期华南地区温度升幅为 $0\sim 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,因此琼北气候变化小<sup>[15]</sup>。王开发等<sup>[13]</sup>研究认为,较琼北更北的北部湾和雷州半岛受第四纪冰期、间冰期气候影响小,这两个地区温度波动不大,干、湿变化较为明显,整个第四纪期间的植被变化是热带常绿季雨林和热带半常绿季雨林—稀树草原或热带针、阔叶混交林—稀树草原与热带稀树草原的交替演变,未见中亚热带北部常绿、落叶混交林和亚热带常绿阔叶林的侵入,始终保持热带植被类型。由于地质体、气候、地形和生物等成土因素相近或相似,研究区土壤性质的变化主要受成土时间这一因素作用,即其为成土时间的函数,由此可以建立土壤性质随成土时间变化的定量模型。所以,研究区是进行土壤发育定量研究较为理想的场所。

## 2 定量研究的原则

模型建立应依据土壤发生学理论,不能仅考虑数据间的拟合程度<sup>[6]</sup>。由于建立土壤发育的时间模型有其固有的困难<sup>[6]</sup>,因此一个模型是否符合土壤发生学原理、能否应用、应用的范围以及效果都需要进行认真讨论。除了满足土壤发生学和第四纪地质学基本思想,我们认为应考虑以下几个土壤发生学特点,才能使土壤发育的统计方程或模型的建立更全面:(1)土壤性质形成和发生变化的尺度存在差异。某些土壤的发生层和特征易形成, $<10^3\text{ a}$ 就可以达到稳定状态,同时也易改变,即为可逆的,如锈纹、锈斑、A层等;有一些发育时间长,一般 $>10^3\text{ a}$ 才能到稳定状态,也不易改变,如雏形层、粘化层等;另一些发育时间长,不易改变,基本上是不可逆的,如氧化层、聚铁网纹层等<sup>[16]</sup>。土壤发生、发育过程中元素的迁移速率明显不同,Ca, Mg, K, Na, U等元素迁移的速率高于Si, P, Fe, Al,更远高于Ti, Zr等。因而研究不同土壤发育时间尺度以及土壤发育阶段所采用的指标是不同的。(2)某些土壤性质对成土环境变化的响应十分迅速,变化周期短,因此对土壤发育的部分阶段有较高的分辨率。超过某一段时间或土壤发育至另一阶段,指标会钝化,分辨率降低。Bain等<sup>[17]</sup>对地处温带的苏格兰Glen Feshie地

区一年代发育系列研究表明,A层盐基饱和度在4 000 a内能较好地指示成土年龄,至5 500 a以后盐基饱和度基本不变,难以反映成土年龄和土壤发育度。Lichter<sup>[18]</sup>对密执安湖的湖积环状沙丘上发育的土壤系列研究显示在形成年龄700 a以内的土壤有机碳量与成土年龄呈良好的线性相关,高于700 a后有机碳量值在一定区域内波动,不能反映土壤发育年代。(3)不同母质系列上形成的土壤间有其各自的土壤发育特征。沉积岩和花岗岩类上发育的土壤中不同粒径的石英质量分数及其与部分元素质量分数的比值以及石英颗粒表面形态特征能显示土壤发育程度<sup>[19]</sup>;用于玄武岩则不适合。(4)不同气候条件下土壤性质反映的土壤发育阶段也有所改变。如B层粘粒质量分数与发育 $10^4\sim 10^5\text{ a}$ 间土壤的成土年龄相关性好,对于南极地区则在 $10^5\sim 10^7\text{ a}$ 范围间相关性显著<sup>[8]</sup>。土壤电导率可反映极地土壤发育状况<sup>[8]</sup>,而对于热带和亚热带地区则不适用。(5)地形部位的不同导致土壤水分状况、侵蚀作用的强度等不同,使土壤性质产生差异。于是,针对位于平坦地形的土壤系列与分布于坡地上的土壤系列、常湿润水分状况下和湿润水分状况下发育的土壤系列评价土壤发育程度的土壤特性是不同的。(6)不同层次的土壤,性质存在分异,发育程度也不同<sup>[6]</sup>。

## 3 现代成土环境和土壤的基本特性

### 3.1 现代成土环境

琼北属热带季风气候。气温和年积温均高,年均温为 $23.0\sim 24.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 年积温8 400~8 800 $^{\circ}\text{C}$ 。同时,降雨丰沛,干湿季分明,雨热同步。琼北地区年降雨量多在1 400~1 800 mm间,雨季(5月下旬—9月)降雨量约占全年的80%。琼北玄武岩分布区主要地形为平整的台地,海拔多在0~100 m间,坡度一般小于 $8^{\circ}$ ,火山锥零星耸立于台地上。在喷发时代晚( $Q_3$ 和 $Q_4$ )的未被利用的玄武岩台地上以刺葵、姚金娘—蜈蚣草、飞机草(*Phoenix hanceana*, *Rhodomyrtus tomentosa*—*Eremochloa ciliaris*, *Eupatorium odortum*)构成的灌草丛群落和白茅、扭黄茅、蜈蚣草(*Imperata cylindrica*, *Heteropogon contortus*, *Eremochloa ciliaris*)构成的草原群落为主。喷发时代早的台地多辟为农业用地和橡胶林(*Hevea brasiliensis*)地,部分台地和火山穹隆上分布次生的台湾相思(*Acacia confusa*)和桉树(*Eucalyptus*)。

表 1 玄武岩上发育土壤的基本特性

Table 1 Basic properties of soils developed from basalt

采样点	土壤深度/ cm	发生层	土壤颜色	pH	$t/10^4$ a
琼山市 十字路 HE09	0~15	Ap	暗棕 10YR 4/4	6.38	1 <sup>[20]</sup>
	15~30	(A)C	黑棕 10YR 3/2	6.57	
	30~50	C <sub>1</sub>	灰白 10YR 8/1 与 10YR 3/1 杂	7.13	
	50~80	C <sub>2</sub>	灰白 10YR 8/1 为主	6.89	
	80+	R			
儋州市 洋浦 HW03	0~12	A	棕 7.5YR 4/6	6.17	9.0± 2.0 <sup>[20]</sup>
	12~44	AC	棕 7.5YR 4/6	6.13	
	44~100	C		6.45	
	100+	R			
定安县 石坡乡 HE05	0~15	A	棕 10YR 4/4	5.57	14.6± 0.9 <sup>[21]</sup>
	15~35	A(B)	棕 10YR 4/4	5.49	
	35~50	B	棕 10YR 4/4	6.06	
	50~75	C	暗棕 10YR 3/3	6.30	
	75+	C(R)		6.39	
儋州市 德义岭 HW04	0~6	A	暗红棕 5YR3/4	4.75	64 <sup>[22]</sup>
	6~22	AB	暗红棕 5YR3/6	4.72	
	22~37	B	暗红棕 5YR3/6	5.25	
	37~65	BC	暗红棕 5YR3/5	5.10	
	65~100	C <sub>1</sub>		5.61	
琼山市 云龙镇 HE10	0~25	A	亮红棕 5YR5/8	4.49	133± 18 <sup>[20]</sup>
	25~50	AB	亮红棕 5YR5/6	5.27	
	50~70	B <sub>1</sub>	亮红棕 5YR5/6	5.23	
	70~90	B <sub>2</sub>	亮红棕 5YR5/6	5.11	
	90~120	B <sub>3</sub>	亮红棕 5YR5/6	4.79	
	120~140	BC	亮红棕 5YR5/7	4.77	
儋州市 新盈 农场 HW02	0~25	A	暗红棕 2.5YR 3/6	4.17	181± 8 <sup>[20]</sup>
	25~52	AB	暗红棕 2.5YR 3/6	4.85	
	52~88	B <sub>1</sub>	暗红棕 2.5YR 4/6	4.82	
	88~128	B <sub>2</sub>	暗红棕 2.5YR 4/6	4.64	
	128~150	B <sub>3</sub>	暗红棕 2.5YR 4/6	4.73	
	150~180	BC	暗红棕 2.5YR 4/8	4.86	

土壤类型<sup>[23]</sup>:HE09 为普通湿润正常新成土;HW03, HW05 为普通铁质湿润雏形土;HW04 为盐基筒筒湿润富铁土;HE10 为水化暗红湿润铁铝土;HW02 为腐殖暗红湿润铁铝土。

### 3.2 土壤的基本特性

土壤特性随风化成土年龄而变化,土壤类型也由弱发育的新成土逐渐向高发育的铁铝土演化(表 1)。

## 4 土壤发育过程定量研究

### 4.1 形态特征

在地形平坦,土体未受加速侵蚀作用影响的条件下,土体厚度可以显示土壤的发育程度和发育的相对时间。表 1 显示,随土壤发育,玄武岩上发育土

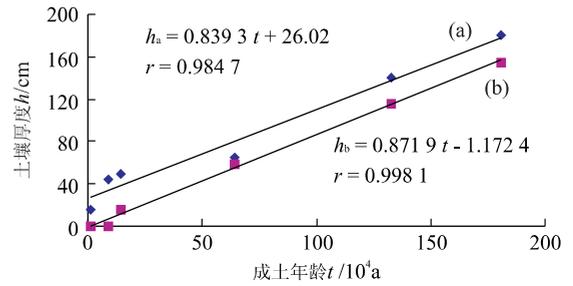


图 1 土体厚度(a)、B层厚度(b)与风化成土年龄的关系  
Fig. 1 Relationship between thickness of solum (a), B horizons (b) and soil ages

壤的土体厚度由 HE09 剖面的 30 cm 增至 HW02 剖面的 180 cm;土壤 B 层厚度同样也从未形成(0 cm)至超过 100 cm。土体和 B 层厚度与成土年龄显著相关(图 1)。虽然 B 层厚度的相关性略高,但对于 B 层未发育的土壤,如 HE09 和 HW03,即在发育浅的土壤上 B 层厚度不具指示意义。

### 4.2 红化率指数(RR)

RR 指数采用以下公式计算:

$$RR = (K - H) \times C / V$$

式中:K 值设定为 12.5,土壤色调(H)10YR, 7.5YR, 5YR, 2.5YR, 10R 分别设为 10, 7.5, 5, 2.5, 0<sup>[24~26]</sup>。C, V 分别为土壤颜色的彩度和明度。

RR 指数随土壤年龄的增加而增大,两者呈良好的线性关系(图 2)。已有研究表明,在热性土温、有相对较长的早期和低有机质条件下,有利于赤铁矿的形成<sup>[26]</sup>。若土壤色调红于 10YR,表明土壤中有赤铁矿存在<sup>[25]</sup>。琼北地区的气候环境正适合于赤铁矿的形成。从 X-射线衍射结果表明,从发育  $1 \times 10^4$  a 左右的 HE09 至发育  $181 \times 10^4$  a 的 HW02 剖面,土壤中赤铁矿质量分数确有增加的趋势;穆斯堡尔谱的结果证实,HW03(发育  $9 \times 10^4$  a)、HW04(发育  $64 \times 10^4$  a)、HW02(发育  $181 \times 10^4$  a)土壤粘粒中赤铁矿质量分数分别从 3.0%, 4.5% 增至 8.9%。说明随成土时间增加,土壤中赤铁矿质量分数提高;由于土壤剖面均具有相似的起源环境和条件,RR 指数应与赤铁矿的质量分数成正比<sup>[25]</sup>,所以赤铁矿质量分数增加,使 RR 指数值增大;由于赤铁矿质量分数与 RR 指数的正比关系,RR 指数高低在反映赤铁矿数量同时,也能够反映出成土年龄大小(图 2)。

### 4.3 元素地球化学特征

4.3.1 常量元素 常量元素的质量分数与组成特征是土壤发育最常用的指标<sup>[27]</sup>。根据这些元素在成

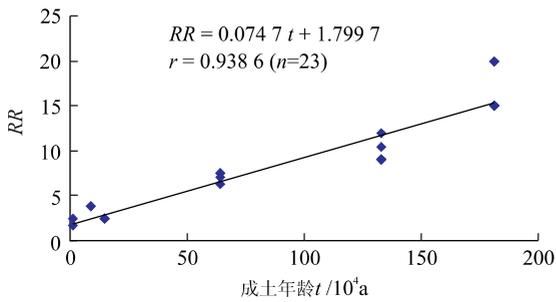


图 2 RR 指数随风化成土年龄变化的趋势  
Fig. 2 Change of RR values with soil ages

土过程中, 因地球化学性质的差异, Ca, Mg, K, Na 淋失迅速, Si 淋失较慢, Fe, Al 相对富集的规律, 元素组合构成以下可作为土壤发育进程或岩石风化的化学指标. 主要有土壤的硅铝率  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  和硅铁铝率  $(n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3))$ .

对于玄武岩发育的土壤系列, 土壤发生层(指非 A 层)的硅铝率和硅铁铝率与成土年龄的关系则比较复杂. 统计分析显示, 在由新成土向富铁土发育阶段, 硅铝率和硅铁铝率变化趋势不明显, 直至富铁土(发育  $61 \times 10^4$  a 和  $64 \times 10^4$  a) 达最高, 进一步向铁铝土发育时, 土壤硅铝率和硅铁铝率与成土年龄间呈对数相关( $R^2$  分别为 0.8637 和 0.9288,  $n=19$ ). 土体硅铝率和硅铁铝率可能受质地分异影响而出现上述情况. 也表明土体的硅铝率和硅铁铝率不能简单地用于评价土壤发育程度, 特别是用于发育程度不深的土壤间更应注意; 由于在风化成土初期(成土时间短), 土壤硅铝率和硅铁铝率与成土时间关系不明确, 在风化成土中后期(成土年龄  $60 \times 10^4$  a 以后), 硅铝率和硅铁铝率随成土时间有规律地下降, 故硅铝率和硅铁铝率主要应用于判断富铁土(中度富铁铝化土壤)向铁铝土(高度富铁铝化土壤)演化时土壤的发育程度.

4.3.2 微量元素 土壤中微量元素间的比值作为判别土壤发育程度的手段. 理想情况是一组元素在成岩过程中具有相近的地球化学行为, 即在母岩中有一固定的比值范围, 但在表生作用、风化作用和成土过程中, 这些元素的地球化学行为产生较大的分异, 体现在风化壳或土壤中元素间的比值与成土母岩中比值相比发生了显著变化, 且随风化成土作用强度呈规律性的变化.

土壤  $w(\text{Ba})/w(\text{Nb})$  值随成土年龄呈指数形式下降, 两者相关性极好(图 3a). 新鲜玄武岩风化为半风化岩石时因风化强度弱, Ba 被新生粘土矿物吸附或形成次生的磷酸盐和硫酸盐, 伴以橄榄石的伊丁石化, 抵抗酸性淋溶<sup>[28]</sup>. 成土风化作用进一步增大后, 次生矿物类型的转变, 酸性淋溶作用提高, Ba 亦被淋洗, 其在土壤中质量分数降低; Nb 难移动<sup>[29]</sup>, 相对富集, 质量分数增加, 导致  $w(\text{Ba})/w(\text{Nb})$  比值随土壤发育程度而降低.

4.3.3 稀土元素 稀土元素地球化学行为是成岩、成矿作用以及地球形成和演化等研究的重要内容<sup>[30]</sup>. 稀土元素在岩石风化过程中的迁移、亏缺和富集规律也已有广泛研究<sup>[28,31]</sup>. 风化作用和成土作用彼此紧密相连, 但又有区别; 而目前应用稀土元素探讨土壤发生与发育程度以及成土过程研究的报道罕见.

土壤 B 层的 REE 总量  $w(\text{REE})$  与成土年龄  $t$  呈极显著线性正相关(图 3b), 表明 REE 总量可作为衡量土壤发育程度的良好指标.

#### 4.4 铁氧化物

游离铁量被认为是成土过程中形成的铁的总量<sup>[32]</sup>. 但因其受母岩含铁量的影响, 所以土壤或粘粒的铁游离度  $w(\text{Fe}_d)/w(\text{Fe}_t)$ , 即游离铁( $\text{Fe}_d$ )与全铁( $\text{Fe}_t$ )质量分数比值, 因其消除了母岩含铁量因

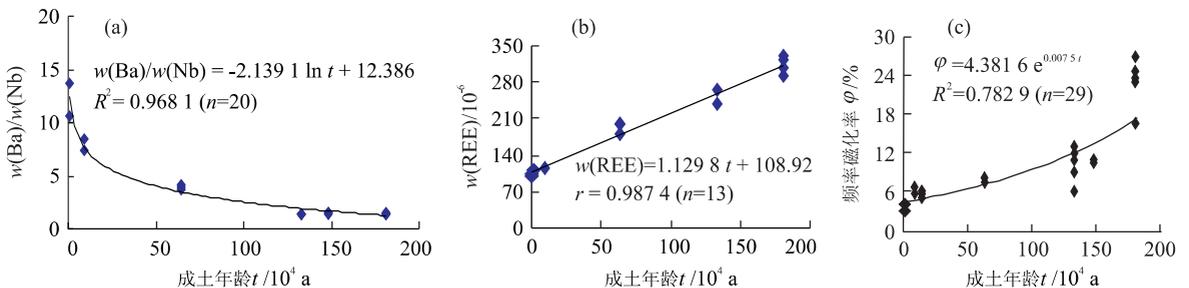


图 3 土壤  $w(\text{Ba})/w(\text{Nb})$  (a)、B 层稀土元素总量  $w(\text{REE})$  (b)、频率磁化率(c)与风化成土年龄  $t$  间的关系

Fig. 3 Relationship between  $w(\text{Ba})/w(\text{Nb})$  (a), total  $w(\text{REE})$  in B horizon (b), frequency dependent susceptibility (c) and soil ages

表 2 土壤中各种化学形态铁的质量分数及其比例关系

Table 2 Iron mass fractions and their ratios of various forms in soils

采样点	土壤深度/cm	$w(\text{Fe}_i)/10^{-3}$	$w(\text{Fe}_d)/10^{-3}$	$w(\text{Fe}_o)/10^{-3}$	$w(\text{Fe}_d)/w(\text{Fe}_i)$	$w(\text{Fe}_o)/w(\text{Fe}_d)$
琼山市 十字路 HE09	0~15	247.9	116.7	19.1	47.1	16.4
	15~30	224.2	104.5	16.3	46.6	15.6
	30~50	—	78.7	13.0	—	16.5
	50~80	191.2	58.4	9.7	30.6	16.6
儋州市 洋浦 HW03	0~12	236.8	127.8	7.8	54.0	6.1
	12~44	212.9	123.3	7.5	57.9	6.1
	44~100	224.3	125.6	6.4	56.0	5.1
	0~15	—	120.8	13.9	—	11.5
定安县 石坡乡 HE05	15~35	230.6	127.1	11.5	55.1	9.0
	35~50	233.2	141.8	6.1	60.8	4.3
	50~75	194.5	133.7	3.9	68.8	2.9
	75+	—	121.5	5.0	—	4.1
儋州市 德义岭 HW04	0~6	201.3	123.4	4.3	61.3	3.5
	6~22	208.6	128.5	4.9	61.6	3.8
	22~37	213.7	131.7	5.7	61.6	4.3
	37~65	212.0	133.7	5.7	63.1	4.3
琼山市 云龙镇 HE10	65~100	229.2	143.9	7.8	62.8	5.4
	0~25	246.2	156.4	2.0	63.5	1.3
	25~50	237.6	154.3	3.5	64.9	2.3
	50~70	223.2	147.4	3.4	66.0	2.3
儋州市 新盈 农场 HW02	70~90	—	146.9	3.4	—	—
	90~120	220.3	148.2	3.2	67.3	2.1
	120~140	—	150.4	3.3	—	2.2
	0~25	247.5	162.9	3.5	65.8	2.1
儋州市 新盈 农场 HW02	25~52	250.8	165.5	4.6	66.0	2.8
	52~88	251.3	172.5	5.0	68.6	2.9
	88~128	254.6	167.3	5.2	65.7	3.1
	128~150	252.3	163.0	5.1	64.6	3.1

注:“—”表该项未测。表中各形态 Fe 质量分数均以  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  表示。

素影响,体现了成土过程中形成铁的总量,更能反映土壤发育程度<sup>[24,33]</sup>。本文研究样品均为玄武岩,因而游离铁质量分数也能较好地反映土壤的发育程度。土壤铁游离度随土壤年龄而提高,从 HE09 剖面(成土年龄  $1 \times 10^4$  a 左右)AC 层的 46.6% 增至 HW02 剖面( $181 \times 10^4$  a)B<sub>2</sub> 层的 68.6%,土壤中平均铁游离度与土壤年龄以对数形式呈极显著的正相关,土壤高度发育后,游离铁的增加减缓(表 2)。

土壤无定形铁( $\text{Fe}_o$ )可以衡量结晶差、如水铁矿等和有机络合态铁的数量<sup>[32]</sup>。发育程度低的土壤无定形铁质量分数高,HE09 剖面的表层土壤中最高至  $19.1 \times 10^{-3}$ ,尽管 HW10 剖面的游离铁质量分数低,但其无定形铁质量分数也达  $14.0 \times 10^{-3}$  左右,而中、高度发育的土壤大多低于  $5.0 \times 10^{-3}$ ,最低为  $2.0 \times 10^{-3}$ (表 2)。土壤或粘粒中氧化铁的活化度( $w(\text{Fe}_o)/w(\text{Fe}_d)$ ),即无定形铁与游离铁质量分数

的比值,可说明游离铁氧化物结晶相对优劣的指标<sup>[34]</sup>;同时也能反映土壤风化的程度<sup>[26]</sup>。在玄武岩发育系列土壤中,发育年龄大于  $133 \times 10^4$  a,铁活化度小于 4.0%,而发育浅的土壤(小于  $133 \times 10^4$  a)均大于 7.0%,相关分析亦表明铁活化度与土壤年龄呈对数形式显著负相关,说明了土壤发育加深,土壤铁氧化物结晶程度的提高。

#### 4.5 磁化率特征

土壤磁化率测定具有便宜、简便、快速、对样品无破坏等特点,在研究起源于相同母质的土壤时,因母质的磁化率背景值相近,可作为比较土壤形成和发育程度的指标<sup>[35]</sup>。

研究结果显示随成土时间增加,成土作用加强,土壤磁化率较母岩—玄武岩普遍增高,但成土年龄和土壤磁化率间并无显著相关性,说明仅以磁化率值不能反映土壤的成土作用强度,而随土壤发育年龄的增加,玄武岩上发育的土壤频率磁化率  $\varphi$  增大,两者具有显著的相关性(图 3c)。因土壤表层易受非成土因素影响,如大火焚烧、生物作用致使干扰土壤频率磁化率,研究土壤发生 B 层或表下层与土壤发育程度和成土年龄的关系,两者相关性更好。同时也更能反映成土作用的强度。已有的对黄土—古土壤系列和湖泊沉积物的研究均表明频率磁化率较质量磁化率具有更明确的古气候意义<sup>[36,37]</sup>。由于影响质量磁化率因素多,成土因素和非成土因素等都可使磁化率产生变异,因而无法反映成土作用强度和土壤发育程度。而频率磁化率则基本只受成土作用形成的超顺磁磁性矿物数量的影响。发育浅的土壤磁性颗粒以单畴和多畴的原生磁铁矿颗粒为主,土壤发育愈深,形成的超顺磁的次生磁赤铁矿越多,其占的比例也越高,频率磁化率值不断提高。所以频率磁化率不仅在温带地区能够很好地指示土壤发育程度,亦可指示热带地区同类母质上形成的土壤的发育程度和相对成土年龄。

## 5 结论

在对琼北地区玄武岩上发育和形成的成土年代土壤系列的土壤性质和特征随土壤年龄变化的统计方程的基础和发生学原则的讨论基础上,分别建立了土体厚度、B 层厚度、RR 指数、稀土元素总量、 $w(\text{Ba})/w(\text{Nb})$ 、 $w(\text{Fe}_d)/w(\text{Fe}_i)$ 、 $w(\text{Fe}_d)/w(\text{Fe}_o)$ 、 $w(\text{Fe}_o)/w(\text{Fe}_d)$ 、土壤硅铝率、土壤铁硅铝率、频率磁化率等

表 3 土壤特性与风化成土年龄的函数统计方程

Table 3 Functional equations of soil properties and ages

土壤性质(Y)	统计方程	t 的范围/a
土体厚度/cm	$Y=0.8393t+26.02^{①}$	$10^3\sim 10^6$ 以上
B 层厚度/cm	$Y=0.8730t-1.3172$	$10^5\sim 2\times 10^6$ 以上
RR 指数	$Y=0.0796t+1.0798^{②}$	$10^5\sim 2\times 10^6$
$w(\text{REE})/10^{-6}$	$Y=1.1298t+108.92^{③}$	$10^3\sim 2\times 10^6$ 以上
$w(\text{Ba})/w(\text{Nb})$	$Y=-2.1391\ln t+12.386$	$10^3\sim 2\times 10^6$ 以上
$w(\text{Fe}_d)/w(\text{Fe}_t)$	$Y=3.629\ln t+47.393^{④}$	$10^3\sim 2\times 10^6$
$w(\text{Fe}_d)/10^{-6}$	$Y=118.9e^{0.0018t}$	$10^3\sim 2\times 10^6$
$w(\text{Fe}_o)/w(\text{Fe}_d)$	$Y=-0.0131t+4.7859$	$10^4\sim 1\times 10^6$
土壤硅铝率	$Y=-1.7713\ln t+10.377$	$10^5\sim 1\times 10^6$
土壤硅铁铝率	$Y=-0.9905\ln t+5.9726$	$10^5\sim 1\times 10^6$
频率磁化率/%	$Y=4.3816e^{0.0075t}$	$10^3\sim 2\times 10^6$

统计方程中 t 单位为  $10^4$  a; ①统计方程在土体未遭受加速侵蚀作用时使用; ②赤铁矿质量分数占土壤重量超过 5% 时不宜使用; ③B 层或表下层, 相近的水分条件; ④相近的水分条件。

土壤性质随成土年代变化的统计方程(表 3)。对于相同或相近地区可分别从这些模型由土壤性质推断相对成土年龄和发育程度, 也可由土壤年龄估计土壤特性, 研究成土速率。同时, 根据稀土元素总量、 $w(\text{Ba})/w(\text{Nb})$ , 频率磁化率等指标探讨土壤发育和成土年龄对于其他地区研究土壤发生也具有指导意义。

### 参考文献:

- [1] Jenny H. The soil resources [M]. New York: Springer-Verlag, 1980. 52—203.
- [2] Stevens P R, Walker T W. The chronosequence concept and soil formation [J]. Q Rev Biol, 1970, 45: 333—350.
- [3] Walker T W. The factor-time in soil formation [J]. New Zealand Soil News, 1966, 6: 153—167.
- [4] Rabenhorst M C. The chrono-continuum: an approach to modeling pedogenesis in marsh soils along transgressive coastlines [J]. Soil Sci, 1997, 162: 2—9.
- [5] Bockheim J G. Solution and use of chronofunctions in studying soil development [J]. Geoderma, 1980, 24: 71—85.
- [6] Schaeztl R J, Barrett L R, Winkler L. Choosing models for soil chronofunctions and fitting them to data [J]. Euro J Soil Sci, 1994, 45: 219—232.
- [7] Pillans B. Soil development at snail's pace: evidence from a 6 Ma soil chronosequence on basalt in north Queensland, Australia [J]. Geoderma, 1997, 80: 117—128.
- [8] Bockheim J G. Soil development rates in the Transant-

arctic Mountains [J]. Geoderma, 1990, 47: 59—77.

- [9] 史学正, 龚子同, 李庆远. 不同时期形成的铁质富铝土特性及其在发生学上的意义 [J]. 土壤学报, 1987, 24(2): 170—179.
- [10] 赵其国. 我国红壤现代成土过程和发育年龄的初步研究 [J]. 第四纪研究, 1992, (4): 341—351.
- [11] 陈俊仁, 黄成彦, 林茂福, 等. 广东田洋火山湖第四纪地质 [M]. 北京: 地质出版社, 1990. 53—60.
- [12] 史学正, 龚子同. 从雷州半岛埋藏古土壤性质论华南第四纪古气候环境的演变 [J]. 土壤学报, 1995, 32(增刊 II): 184—194.
- [13] 王开发, 张玉兰, 蒋辉. 我国华南沿海第四纪植被带迁移和古气候变化 [J]. 科学通报, 1991, 36(6): 447—450.
- [14] 黄镇国, 张伟强, 陈俊鸿, 等. 中国南方红色风化壳 [M]. 北京: 海洋出版社, 1996. 38—304.
- [15] 黄镇国, 张伟强, 陈俊鸿. 中国红土与自然地带变迁 [J]. 地理学报, 1999, 54(3): 193—205.
- [16] Walker P H. Contribution to the understanding of soil and landscape relationships [J]. Austral J Soil Res, 1989, 27: 589—605.
- [17] Bain D C, Mellor A, Robertson-Rintoul M S E, et al. Variation in weathering process and rates with time in a chronosequence of soils from Glen Feshie, Scotland [J]. Geoderma, 1993, 57: 275—293.
- [18] Lichter J. Rates of weathering and chemical depletion in soils across a chronosequence of Lake Michigan sand dunes [J]. Geoderma, 1998, 85: 255—282.
- [19] Marcelino V, Mussche G, Stoops G. Surface morphology of quartz grains from tropical soils and its significance for assessing soil weathering [J]. Euro J Soil Sci, 1999, 50: 1—8.
- [20] 葛同明, 陈文寄, 徐行, 等. 雷琼地区第四纪地磁极性年代表——火山岩钾—氩年龄及古地磁学证据 [J]. 地球物理学报, 1989, 32(5): 550—558.
- [21] 冯锦江, 胡碧茹. 琼北第四纪玄武岩化学风化速率的初步研究 [J]. 地质科学, 1992, (增刊): 295—301.
- [22] 冯国荣. 华南沿海新生代玄武岩基本特征及其构造环境的关系 [J]. 华南沿海新生代地质——中山大学学报论丛(自然科学版), 1992, 27: 93—103.
- [23] 龚子同. 中国土壤系统分类——理论·方法·实践 [M]. 北京: 科学出版社, 1999. 241—778.
- [24] Torrent J, Schwertmann U, Schulze D J. Iron oxides mineralogy of some soils of two river terrace sequences in Spain [J]. Geoderma, 1980, 23: 191—208.
- [25] Torrent J, Schwertmann U, Fechter H, et al. Quantitative relationships between soil color and hematite con-

- tent [J]. *Soil Sci*, 1983, 136: 354—358.
- [26] Torrent J. Iron oxides in Mediterranean soils: properties and influence on soil behavior [A]. In: WCSS, ed. *Transactions of the 15th WCSS* [C]. Acapulco: [s. n.], 1994. 1—14.
- [27] Birkeland P W. *Pedology, weathering, and geomorphological research* [M]. New York: Oxford University Press Inc, 1974. 81—181.
- [28] Price R C, Gray C M, Wilson R E, et al. The effect of weathering on rare-earth element, Y and Ba abundances in Tertiary basalts from southeastern Australian [J]. *Chem Geol*, 1991, 93: 245—265.
- [29] Eggleton R A, Foudoulis C, Varkevisser D. Weathering of basalt: change in rock chemistry and mineralogy [J]. *Clays Clay Miner*, 1987, 35: 161—169.
- [30] 赵振华. 微量元素地球化学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1997. 1—54.
- [31] Condie K C, Dengate J, Cullers R L. Behavior of rare earth elements in a paleoweathering profile on granodiorite in the Front Range, Colorado, USA [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 279—294.
- [32] Birkeland P W, Burke R M, Benedict J B. Pedogenic gradients for iron and aluminum accumulation and phosphorus depletion in Arctic and Alpine soils as a function of time and climate [J]. *Quat Res*, 1989, 32: 193—204.
- [33] Malucelli F, Terribile F, Colombo C. Mineralogy, micromorphology and chemical analysis of andosols on the Island of Saa Miguel (Azores) [J]. *Geoderma*, 1999, 88: 73—98.
- [34] Schwertmann U. The effect of pedogenic environments on iron oxide minerals [J]. *Adv Soil Sci*, 1985, 1: 171—200.
- [35] Mullins C E. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science — a review [J]. *J Soil Sci*, 1977, 28: 223—246.
- [36] 刘秀铭, 刘东生, Heller F. 中国黄土磁颗粒分析及其古气候意义 [J]. *中国科学(B)*, 1991, 21: 639—644.
- [37] 吴瑞金. 湖泊沉积物的磁化率、频率磁化率及其古气候意义 [J]. *湖泊科学*, 1993, 5(2): 128—135.

## QUANTITATIVE STUDIES ON DEVELOPMENT OF TROPICAL SOILS: A CASE STUDY IN NORTHERN HAINAN ISLAND

Huang Chengmin<sup>1</sup>, Gong Zitong<sup>2</sup>

(1. *College of Environmental Science & Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;*  
2. *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008, China*)

**Abstract:** Based on the study of a chronosequence of soils, developed from basalts erupted in different geological times, in the northern Hainan island, the variation of soil properties with soil age increasing in its development has been discussed quantitatively. The results show that such soil properties as solum and B horizon thickness, redness rating ( $RR$ ),  $w(REE)$ ,  $w(Ba)/w(Nb)$ ,  $w(Fe_d)/w(Fe_t)$ ,  $w(Fe_d)$ ,  $w(Fe_o)/w(Fe_d)$ , silica-alumina molecular ratio and silica-sesquioxide ratio of soils, frequency dependent susceptibility, etc. are definitely correlative to the soil ages. The statistical equations between soil properties and ages have been determined according to pedological principles. When found in the same or similar soil-forming environment and regions, relative soil age and soil development degree could be inferred by soil properties which could also be evaluated by soil ages to research rate of soil formation depending on those equations.

**Key words:** basalt; soil development; soil age; quantitative study.

(上接 314 页)

网络技术、音频视频与多媒体技术、电子专用设备和电子测量仪器技术、信息安全技术、信息服务和系统集成技术等领域取得突破。使关系国家安全和经济命脉的关键技术真正掌握在我们手中。实现我国信息技术和信息产业的跨越式发展。

日本的经济、信息产业高速发展,是依靠国家的有序的数字化宏观管理,中国要赶上也必需建立一个全新的网络化、数字化的宏观管理模式,制定人才投资计划、基础设施建设投资计划、产业领域、公益管理机构的信息化推进计划等具体实施计划。可以从建立国家级大型信息产业基地着手,引导全国的信息产业建设由点到面,逐步发展和完善。

### 3 大力扶持建立国家级大型信息产业基地

为避免重复建设和保证国家信息产业发展的有序性,建立一个国家级科技工业硅谷或者称之为信息产业基地显得十分必要,即必须集中力量建立几个大型的高新产业基地,以发挥典型示范和辐射带动的作用。北京、上海和武汉的教育科研力量在全国列前三位,具备了建立这样产业的基本条件。下面以武汉建设“中国光谷”信息产业基地为例来具体分析建立国家级大型信息产业基地的必要性和可行性。

(1)“中国光谷”基地发展的模式。怎样才能建设这样一个基地呢?给政策,给资金,在条件许可的地方加大发展力度,在武汉建设中国光谷,采取全面规划、重点突破,集约型、跨越式的发展模式。①政策倾斜与功能开发相结合。制定优惠政策,创造优美的生态环境,广泛吸引国内外人才、项目、资金。②自主开发与引进外资相结合。充分挖掘现有的技术潜力,在信息光电子和能量光电子领域形成具有自主知识产权的拳头产品;积极与国外大公司、大企业实行“高位嫁接”。③产、学、研相结合。实行高等学校、科研院所和企业的多层次合作,加快科研成果的转化,形成良性循环的光电子信息产业研究与创新体系。

(2)“中国光谷”基地的建设。武汉的光谷会起到什么样的作用呢?这个基地是信息产业宏观调控的典型范例,规模出效益。按照武汉建立光谷的做法,是在我国“十五”计划期间,要使“中国光谷”实现以下目标:①建成 50 km 的光电子信息产业带,形成具有国内第一、国际一流的外向型、国际化的光电子信

息产业基地(中国光谷)。②形成年产值达 1 000 亿元的光电子信息产业规模,成为湖北省、武汉市经济发展的重要增长点和支撑点,推动光电子信息技术在传统工业中的应用,带动和促进一批相关产业的发展。③推动技术创新和技术成果产业化,形成一批具有自主知识产权的产业项目,培植一批光电子信息企业集团,力争产值过百亿元的企业(集团)3~4 家,过 50 亿元的企业(集团)7~8 家。④引进一批国内外光电子信息大项目、大企业,实现项目(企业)的“高位嫁接”,实现产业扩张和产品升级。⑤建设一批光电子信息技术的重点基础学科,形成国内一流的研究开发中心、学术交流中心、人才培养基地和“产、学、研”结合示范基地。

(3)建立“中国光谷”基地的建设途径。按照武汉科技新城建设发展总体规划和带动全省、全市经济发展的总体要求,高水平、高起点、高标准编制电子信息产业基地(中国光谷)的总体发展规划,争取列入国家有关部门发展计划。注重“产、学、研、居”的协调发展,落实国家有关高新技术产业发展的优惠政策,为高新技术企业发展创造良好的环境和条件。①集成大产业,实施大项目,建设大基地,作为发展光电子信息产业的工作主线。采取有效措施使技术、资本、管理等多种生产要素形成集成和互动,促进大院大所的科研成果与产业资本重组、聚合,实现产业的规模扩张和裂变。②扩大对外开放,走国际化道路,加强光电子信息技术领域的国际合作,有针对性、有目标地引进一批大项目和大企业,吸引国际投资,特别是国际风险资本投资,实现国际间技术和资本的“高位嫁接”。创造良好的创业环境,吸引大批海外学子回国参与“中国光谷”建设。在引进的基础上消化、吸收、创新,提高我们的自主创新能力。③拓宽融资渠道,抓好资本营运,推进光电子信息产业与资本市场的结合。要大力促进金融工具的创新,建立高科技风险投资机制。要充分用好用活国家支持高科技企业上市的有关政策,推荐一批有潜力的光电子信息企业参与上市竞争,并且在海外上市和借壳上市方面寻求新的突破。④实行制度创新和企业机制创新,充分调动技术、资本、管理等人员的积极性与创造性。要通过技术股、创业股、管理股等产权制度创新的实施,为技术所有者、管理所有者、资本所有者提供一种持续的动力机制。