

2种母岩发育的地带性土壤中粘土矿物的组成特点

张志毅 黄丽 卢胜 付庆灵

华中农业大学农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070

摘要 采取中国从北到南由花岗岩和片麻岩发育的几种地带性土壤(棕壤、黄棕壤、红壤和砖红壤), 分析其 $< 2 \mu\text{m}$ 粘粒的化学组成和粘土矿物组成特点, 探明气候条件对土壤粘土矿物组成的影响。结果表明: 在棕壤中以2:1型粘土矿物为主, 主要为伊利石, 其次为蛭石和高岭石, 并含有少量蒙脱石; 黄棕壤中高岭石和蛭石占主要部分, 其次为伊利石和蒙脱石; 红壤中蛭石和蒙脱石消失, 主要粘土矿物类型为高岭石, 其次为伊利石和1.4 nm过渡矿物。在热带砖红壤中1.4 nm过渡矿物和蛭石消失, 高岭石含量超过90%, 其次为伊利石及少量三水铝石。粘土矿物的地带性差异主要受气候条件的影响, 由北到南, 随着温度和降雨量增加, 土壤中的高岭石和蒙脱石含量增加, 蛭石的含量降低; 其中年均温和年均降雨量与高岭石含量存在显著正相关性, 与蛭石和蒙脱石含量呈显著负相关性($P < 0.05$)。

关键词 气候; 花岗岩; 片麻岩; 粘土矿物; 地带性土壤

中图分类号 P 575.5; S 151⁺.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2015)03-0051-08

粘土矿物是影响土壤物理和化学性质的重要因素, 关于粘土矿物的起源、分布和形成是土壤学研究的热点问题^[1]。粘土矿物的形成和演变与时间、气候条件和成土母质等密切相关, 气候的改变能够显著影响粘土矿物的形成及其转变^[2]。因此, 研究不同气候条件下土壤中粘土矿物组成的异同, 对明晰粘土矿物形成过程及土壤矿物风化机理具有重要意义。

气候主要通过温度(物理因素)和降雨量(化学因素)来影响土壤风化过程^[3]。在风化过程中水分是重要的影响因素, 降雨量的增加能够提高风化速率。当这些条件变化时, 相同母质下会产生不同的次生矿物。例如在潮湿温暖的气候条件下, 淋滤作用较强, 母岩风化时, 一些碱金属、碱土金属元素容易被淋滤流失, 会先形成蒙脱石, 进一步形成高岭石。因此, 高岭石和三水铝石通常分布于热带地区, 温暖和潮湿的气候有利于高岭石向铝土矿转变^[4]。而云母通常存在于较低温度及淋溶条件下, 即干燥和寒冷的气候中^[5]; 温暖和季节性干燥环境及温暖和潮湿环境间变换时通常会形成蒙脱石/高岭石混层矿物^[6]。对强降雨区和少降雨区土壤中粘土矿物

组成的研究发现, 1:1型粘土矿物和铁铝氧化物主要存在于强降雨区, 而少降雨区主要粘土矿物类型为2:1型^[7]。

花岗岩和片麻岩是中国分布较广且物质组成相似的成土母岩, 其发育的土壤与其他母质发育的土壤矿物组成会有很大差异。对花岗岩和片麻岩母质发育土壤的研究较多且集中在土壤侵蚀和养分供应等方面^[8-9], 但是对于不同气候条件下其发育的土壤中矿物组成特点的报道较少。笔者以中国花岗岩和片麻岩发育的几种水平地带性土壤(棕壤、黄棕壤、红壤和砖红壤)为材料, 通过分析土壤中 $< 2 \mu\text{m}$ 粘粒的粘土矿物组成特点, 探讨气候变化对这2种母岩发育的土壤中粘土矿物演化的影响, 为粘土矿物形成及转化的研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

选取中国由北到南分布的主要地带性土壤(棕壤、黄棕壤、红壤和砖红壤)(表1)。棕壤(SD-1和SD-2)位于我国暖温气候带, 年平均降水量697~730 mm, 年平均气温13℃, 海拔163~176 m。黄

收稿日期: 2014-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271252); 中央高校基本科研业务费专项(2013PY002)

张志毅, 博士研究生, 研究方向: 粘土矿物, E-mail: zzyouxin@163.com

通信作者: 黄丽, 博士, 教授, 研究方向: 土壤环境化学和土壤肥力, E-mail: daisyh@mail.hzau.edu.cn

棕壤(LT-1、LT-2、XS-1 和 XS-2)与红壤(TC-1 和 TC-2)位于我国亚热带气候区,年平均降水量 1 300~1 450 mm,年平均气温为 15.5~16.9℃,海拔 75~158 m。砖红壤(HN-1 和 HN-2)位于我国

热带气候区,年平均降雨量 1 815 mm,年平均气温 23.5℃,海拔为 143~167 mm。SD-1、SD-2、XS-1 和 LT-2 土壤的成土母岩为片麻岩,其余土壤发育于花岗岩。

表 1 采样点分布及概况

Table 1 Distribution and situation of samples

编号 Samples	土壤类型 Classification	深度/m Depth	层次 Horizon	采样点 Location	坐标 Coordinate	海拔/m Altitude	Munsell 颜色 Color	土地利用 Land use	母岩 Parent materials
SD-1	棕壤 Brown soil	0~19	A	山东 Shandong	N: 36°5' E: 117°24'	163	7.5YR4/4	耕地 Cultivated land	片麻岩 Gneiss
		19~58	B				7.5YR 5/6		
		58~	C				7.5YR 5/6		
SD-2	棕壤 Brown soil	0~14	A	山东 Shandong	N: 36°15' E: 117°15'	176	7.5YR4/4	园地 Garden plot	片麻岩 Gneiss
		14~42	B				5YR 2/4		
		42~	C				5YR4/6		
XS-1	黄棕壤 Yellow brown soil	0~18	A	湖北 Hubei	N: 30°35' E: 115°22'	60	5YR 2/4	耕地 Cultivated land	片麻岩 Gneiss
		18~77	B				5YR 5/8		
		77~	C				5YR 2/4		
XS-2	黄棕壤 Yellow brown soil	0~21	A	湖北 Hubei	N: 30°33' E: 115°25'	75	5YR 4/2	耕地 Cultivated land	花岗岩 Granite
		21~114	B				7.5YR 5/6		
		114~	C				7.5YR 6/8		
LT-1	黄棕壤 Yellow brown soil	0~28	A	湖北 Hubei	N: 30°38' E: 115°26'	158	7.5YR 5/6	林地 Woodland	花岗岩 Granite
		28~80	B				7.5YR 5/6		
		80~	C				7.5YR 5/6		
LT-2	黄棕壤 Yellow brown soil	0~28	A	湖北 Hubei	N: 30°47' E: 115°24'	60	7.5YR 3/4	耕地 Cultivated land	片麻岩 Gneiss
		28~54	B				7.5YR 4/4		
		54~	C				7.5YR 5/6		
TC-1	红壤 Red soil	0~47	A	湖北 Hubei	N: 29°13' E: 113°46'	144	2.5YR5/8	林地 Woodland	花岗岩 Granite
		47~118	B				10R4/8		
		118~	C				2.5YR7/6		
TC-2	红壤 Red soil	0~28	A	湖北 Hubei	N: 29°19' E: 113°47'	119	10YR5/10	林地 Woodland	花岗岩 Granite
		28~85	B				5YR 5/8		
		85~	C				2.5Y6/3		
HN-1	砖红壤 Laterite	0~28	A	海南 Hainan	N: 19°31' E: 109°29'	167	7.5YR5/6	林地 Woodland	花岗岩 Granite
		28~79	B				5YR4/6		
		79~	C				2.5YR7/6		
HN-2	砖红壤 Laterite	0~26	A	海南 Hainan	N: 19°27' E: 109°17'	143	5YR 5/8	园地 Garden plot	花岗岩 Granite
		26~81	B				5YR 5/8		
		81~	C				2.5YR7/6		

1.2 样品分析

1) 基本性质的测定^[10]。土壤质地用吸管法(采用国际制土壤质地分类标准);pH 用电位法(水土比 1:2.5);阳离子交换量(CEC)用醋酸铵浸提法;有机质用重铬酸钾外加热法。供试土壤的基本理化性质见表 2。

2) 粘土矿物的鉴定^[11]。沉降虹法提取小于 2 μm 粘粒。脱铁处理后的粘粒样品经 MgCl₂-甘油和 KCl 饱和处理后,均匀涂于玻片上用于 X 射线衍射分析(XRD)(德国布鲁克公司 D8 ADVANCE)。

KCl 饱和和片,分别加热到 110、300 和 550℃后再次进行 XRD 分析。测试条件为 Cu-Kα 辐射,管压 40 kV,管流 40 mA,扫描方式为步进扫描,速度为 10°/min,步长 0.01°。粘土矿物含量通过加权 MgCl₂-甘油饱和和片衍射峰面积的方法来估算。

2 结果与分析

2.1 土壤的基本性质

供试红壤和砖红壤的土地利用方式主要为林地,棕壤和黄棕壤的土地利用方式主要为耕地

(表 1)。棕壤的 pH 在 5.3~7.0 之间,呈微酸性和中性;黄棕壤的 pH 大部分在 4.7~6.2 之间,呈弱酸性;而红壤和砖红壤的 pH 在 4.6~5.2 之间,呈酸性。可见,在温度和降雨量较高的地区土壤酸化程度较高。对于碱金属元素, K 含量在棕壤中为 38~54 g/kg;黄棕壤中 K 含量除 LT-2 超过 80 g/kg 外,其余的都在 30 g/kg 左右;而红壤 K 含量为 54~84 g/kg;K 含量在砖红壤中最低,低于 21 g/kg。棕壤中钙(Ca)含量大部分在 7.0 g/kg 左右,最高的为 11.5 g/kg;黄棕壤的 Ca 含量大部分低于 6 g/kg,最高的为 11.4 g/kg;红壤中的 Ca 含量全部低于 6 g/kg,而砖红壤中 Ca 含量低于 0.5 g/kg。土壤中 Mg 的平均含量为黄棕壤(9.1 g/kg)>棕壤

(5.0 g/kg)>红壤(3.2 g/kg)>砖红壤(1.3 g/kg)。不同类型土壤中 Fe 的平均含量为黄棕壤(39.4 g/kg)>砖红壤(24.9 g/kg)>红壤(17.5 g/kg)>棕壤(16.8 g/kg)。这几种土壤中的有机质含量低于 13.0 g/kg,并随着土壤深度的增加而降低。由北到南,棕壤、黄棕壤、红壤和砖红壤的阳离子交换量(CEC)依次减少,其数值范围分别为 8.2~16.0、6.9~26.7、6.7~19.3 和 3.6~12.7 cmol/kg,交换性阳离子(K⁺、Na⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺)也有相同的趋势。这主要是因为随着纬度的降低,降雨量增加,淋溶作用变强,导致土壤的阳离子含量降低。由北到南,土壤中粘粒含量增加。棕壤和黄棕壤的粘粒含量在 150 g/kg 左右,土壤质地主要为

表 2 供试土壤基本理化性质¹⁾

Table 2 The basic physical and chemical properties of the tested soils

编号 Samples	层次 Horizon	pH	OM/ (g/kg)	K/ (g/kg)	Ca/ (g/kg)	Mg/ (g/kg)	Fe/ (g/kg)	交换性阳离子/(cmol/kg) Exchangeable cation					粘粒/ (g/kg) Clay	质地 Texture
								K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CEC		
SD-1	A	5.6	9.7	42.3	6.5	3.7	13.9	0.2	0.5	3.1	0.9	9.4	157	SL
	B	6.5	4.3	38.4	7.7	3.0	10.2	0.1	0.1	3.0	1.2	8.2	113	SL
	C	6.8	3.0	42.7	4.5	3.4	12.7	0.1	0.2	3.2	1.3	8.5	101	SL
SD-2	A	5.3	7.1	54.6	2.7	8.2	26.4	0.5	2.4	4.9	1.5	16.0	122	L
	B	6.3	7.0	52.9	7.7	7.1	19.8	0.1	0.3	5.4	1.2	14.5	176	CL
	C	7.0	1.5	42.8	11.5	4.4	17.7	0.1	0.6	3.5	1.5	8.0	63	LS
XS-1	A	4.9	18.5	30.3	5.1	7.6	34.0	0.2	0.4	5.1	1.7	15.0	192	SCL
	B	5.3	13.0	26.9	6.4	8.7	34.4	0.1	0.2	6.1	2.4	18.0	247	SCL
	C	5.6	7.4	24.9	1.6	10.6	37.2	0.0	0.1	6.7	3.5	20.7	180	SCL
XS-2	A	5.0	20.7	53.1	1.5	12.3	37.8	0.2	0.4	6.7	1.7	17.3	137	SL
	B	5.7	6.7	28.2	1.6	10.9	40.3	0.1	0.1	9.7	4.8	25.7	123	SL
	C	5.7	7.3	23.0	4.6	12.8	44.1	0.1	0.1	11.5	4.7	26.7	133	SL
LT-1	A	5.2	16.4	34.7	11.4	3.3	17.3	0.1	0.3	2.5	0.6	7.0	150	SCL
	B	5.1	15.1	35.2	7.1	3.0	17.7	0.1	0.2	4.5	0.6	8.0	151	SCL
	C	5.2	10.1	34.3	6.6	3.8	30.2	0.1	0.5	2.6	0.9	6.9	118	SL
LT-2	A	5.6	18.9	80.0	0.5	11.7	52.4	0.2	0.4	5.7	1.2	12.4	212	SCL
	B	6.2	9.8	88.2	0.4	9.7	54.2	0.2	0.5	7.4	1.9	14.6	261	SCL
	C	6.7	5.0	121.5	0.1	14.6	73.1	0.9	3.9	6.3	1.8	14.1	182	SL
TC-1	A	4.9	5.4	58.1	0.8	2.4	19.2	0.2	0.1	0.8	0.4	16.2	384	LC
	B	4.8	4.5	59.3	0.7	2.1	20.3	0.1	0.1	0.4	0.1	19.3	363	LC
	C	4.9	1.5	56.4	1.0	2.8	20.4	0.1	0.1	0.3	0.1	10.8	344	LC
TC-2	A	4.8	3.5	83.4	5.9	3.5	13.1	0.1	0.1	3.1	0.4	6.7	145	SL
	B	4.7	2.4	54.7	4.0	3.7	16.3	0.1	0.1	0.5	0.6	9.1	205	SCL
	C	4.9	1.7	63.5	3.9	4.7	15.7	0.2	0.4	1.9	0.4	7.4	129	L
HN-1	A	5.1	17.0	6.8	0.4	1.0	17.2	0.0	0.0	5.7	3.3	12.7	283	SCL
	B	4.6	13.7	20.5	0.2	1.4	25.9	0.0	0.0	0.0	0	5.2	429	LC
	C	5.4	9.0	18.0	0.2	2.1	42.7	0.0	0.0	0.1	0.1	10.6	468	HC
HN-2	A	5.1	15.4	7.1	0.2	0.9	15.3	0.0	0.0	0.2	0.1	3.6	250	SCL
	B	5.0	10.8	9.2	0.2	1.1	20.3	0.0	0.0	0.2	0.1	4.7	343	SC
	C	5.2	9.9	11.3	0.4	1.5	27.7	0.0	0.0	0.7	0.4	9.6	452	SC

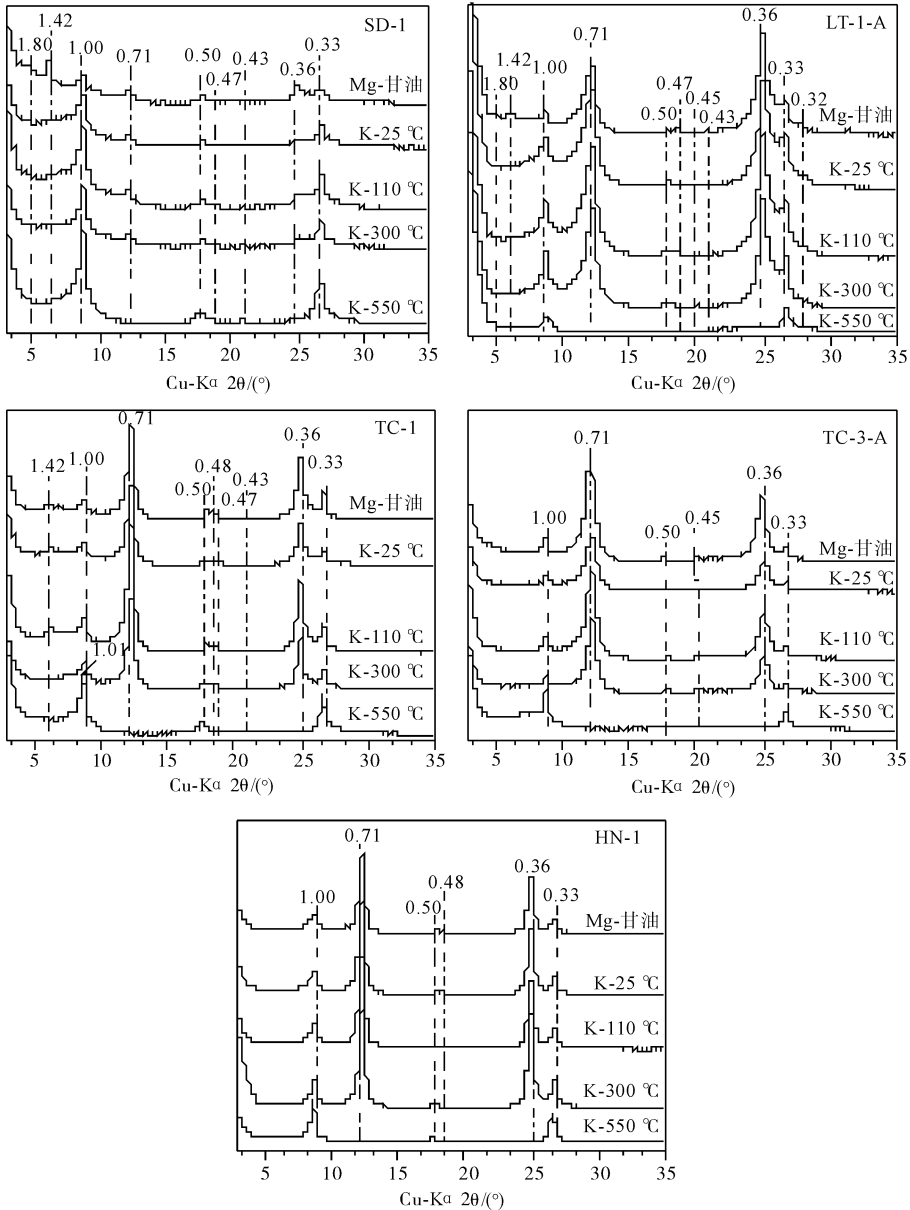
1) OM: 有机质 Organic matter; CEC: 阳离子交换量 Cation exchange capacity; 质地为国际制土壤质地分类标准 International classification of texture; SL: 砂壤土 Sandy loam; L: 壤土 Loam; CL: 粘壤土 Clay loam; SCL: 砂粘壤土 Sandy clay loam; LC: 轻粘土 Light clay; HC: 重粘土 Heavy clay; SC: 砂粘土 Sandy clay.

砂壤土和砂粘壤土;红壤和砖红壤中粘粒含量超过了 200 g/kg,土壤质地多为砂粘土和轻粘土。

2.2 粘土矿物种类

相同类型的土壤和同一土壤不同层次的粘土矿物 XRD 衍射图谱比较相似,所以选取代表性土壤 A 层($< 2 \mu\text{m}$)样品的 XRD 衍射图谱进行分析

(图 1)。所有样品经 MgCl_2 -甘油和 KCl 饱和处理后, XRD 图谱中均有 1.00、0.50 和 0.33 nm 衍射峰,其 KCl 饱和片经加温处理后不消失,这表明存在伊利石。所有样品经 MgCl_2 -甘油处理后均含有 0.71 和 0.36 nm 衍射峰,并且 K 饱和样品经 110 和 300 $^\circ\text{C}$ 加温处理后,这些特征峰没有消失,而加温



Mg-甘油: MgCl_2 -甘油饱和处理 Mg Cl_2 -glycerin saturated processing; K-25 $^\circ\text{C}$: KCl 饱和处理 Saturated KCl processing; K-110 $^\circ\text{C}$: KCl 饱和处理后加温到 110 $^\circ\text{C}$ Saturated KCl treatment after heating to 110 $^\circ\text{C}$; K-300 $^\circ\text{C}$: KCl 饱和处理后加温到 300 $^\circ\text{C}$ Saturated KCl treatment after heating to 300 $^\circ\text{C}$; K-550 $^\circ\text{C}$: KCl 饱和处理后加温到 550 $^\circ\text{C}$ Saturated KCl treatment after heating to 550 $^\circ\text{C}$.

图 1 典型样品的 XRD 衍射图谱

Fig.1 XRD patterns of typical samples

550 °C 后衍射峰消失,说明存在高岭石。

棕壤 SD-1 和黄棕壤 LT-1 的 A 层样品经 MgCl₂-甘油饱和处理后出现 1.80 和 1.42 nm 的衍射峰,经 KCl 饱和处理后,1.80 和 1.42 nm 衍射峰的强度减弱,并向低 d 值偏移,使得 1.00 nm 峰的强度相对增强,加温到 550 °C 时 1.42 nm 衍射峰消失,这说明含有蒙脱石和蛭石类矿物。0.43 nm 处微弱的峰说明含有少量的石英。因此,棕壤和黄棕壤中粘土矿物为蛭石、伊利石、高岭石和蒙脱石以及石英。

红壤粘粒经 MgCl₂-甘油处理后出现 1.42 nm 衍射峰,经 KCl 饱和处理后没有收缩,而 K 饱和加温 300 °C 后 1.42 nm 峰向 1.00 nm 峰收缩移动,并形成 1 个宽峰;加温 500 °C 后,1.42 nm 峰全部收缩成不对称的 1.00 nm 峰,说明在 TC-1 红壤的粘土矿物中存在大量 1.4 nm 过渡矿物,且蛭石消失。TC-2 样品经 MgCl₂-甘油和 K 饱和处理没有出现 1.42 nm 衍射峰,说明不含有蛭石。因此,红壤中主

要存在伊利石、高岭石及少量石英,部分样品有 1.4 nm 过渡矿物。

砖红壤(图 1,HN-1)经 MgCl₂-甘油饱和处理后出现 1.00、0.71、0.50、0.48、0.36 和 0.33 nm 衍射峰,这些主要是伊利石、高岭石及三水铝石的特征衍射峰。高岭石 d(001)衍射峰更加尖锐,并且左右对称,说明该土壤高岭石的结晶度更好;三水铝石(0.48 nm)衍射峰的出现,说明粘粒出现富集铁铝的现象。

可见,由北到南,随着温度和降雨量的增加,供试土壤中粘土矿物由 2:1 型向 1:1 型转变,其中最先消失的粘土矿物为蒙脱石,之后为蛭石,随着蛭石的减少土壤中开始出现 1.4 nm 过渡矿物,最终土壤中主要的粘土矿物为高岭石和伊利石,并出现三水铝石。

2.3 粘土矿物含量

棕壤中含量最高的粘土矿物为伊利石(表 3),

表 3 土壤中粘土矿物类型及其相对含量¹⁾

Table 3 Types and relative content of clay minerals in soils

编号 Samples	层次 Horizon	蒙脱石 Montmorillonite	1.4 nm 过渡矿物 1.4 nm intergrade minerals	蛭石 Vermiculite	伊利石 Illite	高岭石 Kaolinite	三水铝石 Gibbsite
SD-1	A	+	/	++	++++	++	/
	B	+	/	++	+++	++	/
	C	+	/	++	+++	++	/
SD-2	A	+	/	++	+++	+++	/
	B	+	/	+++	+++	++	/
	C	+	/	+++	+	+++	/
XS-1	A	+	/	++	+++	+++	/
	B	+	/	++	++	++++	/
	C	+	/	++	++	++++	/
XS-2	A	+	/	+++	++	++	/
	B	+	/	+++	+	+++	/
	C	+	/	+++	+	+++	/
LT-1	A	+	/	++	++	++++	/
	B	++	/	+	++	++++	/
	C	++	/	+	+	++++	/
LT-2	A	++	/	++	+++	+++	/
	B	++	/	++	+++	+++	/
	C	++	/	+++	+++	+++	/
TC-1	A	/	++	/	++	++++	/
	B	/	++	/	+++	++++	/
	C	/	+	/	++	++++	/
TC-2	A	/	/	/	++	++++	/
	B	/	/	/	++	++++	/
	C	/	/	/	++	++++	/
HN-1	A	/	/	/	+++	++++	+
	B	/	/	/	+++	++++	+
	C	/	/	/	+++	++++	+
HN-2	A	/	/	/	+++	++++	+
	B	/	/	/	+++	++++	+
	C	/	/	/	++	++++	+

1) +: < 100 g/kg; ++: 100~250 g/kg; +++: 250~500 g/kg; ++++: 500~750 g/kg; /: 未检测到: Not detected.

其含量在 250~500 g/kg 之间,在 SD-1A 层中超过 500 g/kg;其次为蛭石和高岭石,其含量在 100~250 g/kg 之间。因为在弱酸-中性环境下,淋溶作用较弱,伊利石脱钾缓慢,因此,蛭石和高岭石的含量较少。不同剖面间比较发现,在剖面 A、B 层中含有较多的蒙脱石(100 g/kg 左右),在母质层中伊利石含量减少,高岭石和蛭石含量增加。

黄棕壤的粘土矿物种类和棕壤的相同,但是黄棕壤中的粘土矿物主要为高岭石,其含量在 500~750 g/kg 之间,部分含量在 250~500 g/kg 之间;伊利石和蛭石的含量在 250 g/kg 左右,黄棕壤中蒙脱石的含量部分超过 100 g/kg,相比棕壤有所提高。对于黄棕壤的不同层次,母质层中伊利石和蛭石的含量降低,高岭石增加。与同地区其他母质发育的黄棕壤相比,Q₃母质发育的黄棕壤以伊利石为主,其次为蛭石和高岭石^[12]。

花岗岩发育的黄棕壤中伊利石的含量低于片麻岩发育的,前者伊利石的含量约为 250~500 g/kg,后者低于 250 g/kg。相比棕壤和黄棕壤,红壤的粘土矿物类型发生变化,其中蛭石和蒙脱石消失,出现 1.4 nm 过渡矿物(100~250 g/kg),并且伊利石含

量低于 250 g/kg,高岭石大部分超过 500 g/kg。由 A 层到 C 层,土壤中伊利石含量降低,高岭石的含量增加。

砖红壤中粘土矿物种类更加单一,出现三水铝石,其含量低于 100 g/kg,其余全部为伊利石和高岭石。不同层次间粘土矿物含量相似,没有明显变化。

2.4 气候条件和金属元素与粘土矿物的相关性

由表 4 可知,年均降雨量和年均温度与土壤中一些金属元素以及粘土矿物之间存在很好的相关性,其中年均温和年均降雨量与 K、Ca 和交换性 K⁺ 存在显著负相关性($P < 0.05$),与粘粒含量和有机质存在显著正相关关系($P < 0.05$),此外,年均降雨量与交换性 Ca²⁺ 存在极显著负相关关系($P < 0.01$)。可见,水平地带气候条件的变化,能够影响土壤中一些金属元素和交换性阳离子的含量,随着降雨量和温度的增加,土壤中 K、Ca 和交换性 K⁺、Ca²⁺ 的含量降低(表 2)。年均温和年均降雨量与高岭石含量呈极显著正相关,相关系数分别为 0.42 和 0.69($P < 0.01$);与蛭石含量极显著负相关($P < 0.01$),与蒙脱石呈显著负相关性($P < 0.05$)。

表 4 年均降雨量和年均温与金属元素及粘土矿物的相关性($n=30$)¹⁾

Table 4 The correlation of average annual precipitation and annual average temperature with metal elements and clay minerals ($n=30$)

项目 Item	温度 Temperature	降雨量 Precipitation	蒙脱石 Montmorillonite	蛭石 Vermiculite	伊利石 Illite	高岭石 Kaolinite
K	-0.53**	-0.31*	0.39*	0.19	-0.13	-0.19
Ca	-0.57**	-0.62**	0.16	0.32*	-0.19	-0.18
Mg	-0.30	-0.30	0.35*	0.63**	-0.45**	-0.34**
Fe	0.16	0.14	0.37*	0.30	-0.32*	-0.15*
CEC	-0.22	-0.15	-0.04	0.56**	-0.44**	-0.16
交换性 K ⁺ Exchangeable K ⁺	-0.36*	-0.32*	0.40*	0.24	-0.05	-0.30
交换性 Na ⁺ Exchangeable Na ⁺	-0.25	-0.29	0.36*	0.19	-0.01	-0.27
交换性 Ca ²⁺ Exchangeable Ca ²⁺	-0.26	-0.33*	0.34*	0.67**	-0.41*	-0.39*
交换性 Mg ²⁺ Exchangeable Mg ²⁺	-0.11	-0.20	0.10	0.57**	-0.39*	-0.25
高岭石 Kaolinite	0.42**	0.69**	-0.51**	-0.66**	-0.37*	
伊利石 Illite	0.14	-0.07	-0.01	-0.40**		
蛭石 Vermiculite	-0.50**	-0.60**	0.24			
蒙脱石 Montmorillonite	-0.31*	-0.41*				

1) 温度指年均温 The annual average temperature; 降雨量指年均降雨量 The annual average rainfall; *: 两者相关性达到显著性 $P < 0.05$ Significant difference among samples was detected at the $P < 0.05$ level; **: 两者间相关性达到极显著性 $P < 0.01$ An extremely significant difference among samples was detected at the $P < 0.01$ level.

土壤中一些金属元素和交换性阳离子与粘土矿物的含量存在相关性。K、Mg、交换性 K⁺、交换性

Ca²⁺ 与蒙脱石间存在显著正相关性,相关系数分别为 0.39、0.35、0.40 和 0.34($P < 0.05$)。Ca、交换性

Ca^{2+} 和交换性 Mg^{2+} 与蛭石存在显著正相关性, 相关系数分别为 0.32、0.67 和 0.57 ($P < 0.05$)。交换性 Ca^{2+} 和交换性 Mg^{2+} 与伊利石间存在显著负相关性 ($P < 0.05$)。交换性 Ca^{2+} 与高岭石为显著负相关性 (-0.39) ($P < 0.05$)。可以看出粘土矿物的类型和含量与气候以及土壤中金属元素、交换性阳离子等因素都有密切的关系。

3 讨论

本研究中由北到南, 随着温度和降雨量的增加, 粘土矿物从 2:1 型向 1:1 型转变, 主要表现为高岭石和三水铝石含量增加, 蛭石和蒙脱石含量减少, 同时部分红壤中会出现 1.4 nm 过渡矿物(表 3)。粘土矿物的形成、转化受气候、母岩、植被、时间等多种因素控制。本研究中所采土壤发育于花岗岩和片麻岩, 片麻岩为花岗岩变质而来, 其主要原生矿物类型相同, 包括石英、长石和云母等; 同时所采土壤为水平地带土壤且土地利用类型相似, 因此, 气候条件和成土时间是影响其粘土矿物形成转化的主要因素。构成气候的主要因素为温度和降雨量, 温度和降雨量能够影响土壤淋溶作用的强弱。通常情况下淋溶作用随着温度和降雨量的增加而增强, 从而导致土壤中的一些碱金属、碱土金属元素被淋滤消失, 最终改变土壤中粘土矿物组成^[13]。温度和降雨量与粘土矿物的含量存在显著相关性, 年均温和年均降雨量与高岭石存在显著正相关性, 与蛭石和蒙脱石存在显著负相关性 ($P < 0.05$) (表 4)。时间因素可以体现土壤的不断发展过程, 成土时间长, 受到气候作用持久, 矿物风化完全。Lichter^[14] 对沙丘发育而成土壤研究发现, K、Na、Ca、Mg 损失量与土壤年龄呈指数负相关。本研究中, 红壤和砖红壤中 K、Na、Ca、Mg 的含量低于棕壤和黄棕壤(表 1), 而 K、Na、Ca、Mg 等元素是粘土矿物重要组成元素, 其含量在某种程度上能够影响粘土矿物的种类和数量。因此, 不同气候条件下土壤中粘土矿物组成具有地带性特点。

对于花岗岩和片麻岩发育的棕壤、黄棕壤、红壤和砖红壤, 其粘土矿物组成具有地带性分布特点。棕壤位于暖温气候带, 其粘土矿物含量最高的为伊利石, 其次为蛭石和高岭石并含有少量蒙脱石(表 3)。伊利石通常由多钾原生铝硅酸盐矿物在强物理风化、弱碱性和弱淋滤作用下风化而成^[15-16]。棕壤的母质为片麻岩(表 1), 片麻岩中含有大量多

钾原生铝硅酸盐矿物, 如钾长石(40%)和酸性斜长石等。在气温较低条件下, 长石类矿物经脱钾过程而形成大量伊利石。蒙脱石是在富盐基、碱性介质中形成的, 它可由云母类矿物或由辉石、角闪石转变过来^[17]。本研究中的棕壤位于暖温气候带, 气温较低, 有利于蒙脱石的积累, 因此, 在棕壤中存在少量蒙脱石。黄棕壤位于亚热带气候区, 其粘土矿物含量最高的为高岭石, 其次为蛭石和伊利石, 蒙脱石含量最少。相比棕壤中的粘土矿物, 黄棕壤中蛭石和蒙脱石含量增加。蛭石是在微酸性 (pH 值一般大于 5.6) 环境中, 由于淋滤作用, 土壤中 K^+ 、 Mg^{2+} 淋失的条件下形成的^[18], 因此, 主要分布在温带和亚热带地区排水良好的土壤中。黄棕壤地区温度和降雨量都要高于棕壤地区, 且黄棕壤的 pH 值在 5.6 左右(表 2), 有利于蛭石形成, 蛭石进一步形成蒙脱石, 所以黄棕壤中蛭石和蒙脱石含量增加。红壤位于亚热带气候区, 主要存在的粘土矿物为高岭石和伊利石, 蛭石消失, 部分样品中出现 1.4 nm 过渡矿物。随着纬度的降低, 降雨量和温度的增加, 在强淋溶作用下, 土壤中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等金属离子含量降低(表 2), 不利于蛭石和蒙脱石的形成。因此, 亚热带的红壤中蛭石和蒙脱石消失。1.4 nm 过渡矿物是表生风化下成土作用的产物, 在有机质含量低且干湿交替的环境下, 土壤中蛭石或者蒙脱石等膨胀性粘土矿物中羟基化铝离子吸附到层间, 羟基化的铝离子在层间发生聚合形成“岛屿状”羟基铝层。红壤的 pH 低于 5, 并且土壤中有机质含量低(表 2), 有利于 1.4 nm 过渡矿物形成。因此, 红壤中主要粘土矿物类型为高岭石, 其次为伊利石和 1.4 nm 过渡矿物。热带多雨气候区的砖红壤中, 主要粘土矿物类型为高岭石, 其次为伊利石, 同时含有少量三水铝石。本研究中砖红壤发育于花岗岩, 花岗岩中常含有大量难于风化的石英, 以及较难风化的钾长石和白云母等, 因此, 花岗岩发育的砖红壤中仍存在少量未风化的伊利石。

参 考 文 献

- [1] WILSON M. The origin and formation of clay minerals in soils: past, present and future perspectives[J]. Clay Minerals, 1999, 34 (1): 7-24.
- [2] LOCSEY K L, GRIGORESCU M, COX M E. Water-rock interactions: an investigation of the relationships between mineralogy and groundwater composition and flow in a subtropical

- basalt aquifer[J]. *Aquatic Geochemistry*, 2012, 18(1): 45-75.
- [3] VELDE B. Introduction to clay minerals[M]. The Netherlands: Springer, 1992.
- [4] THIRY M. Palaeoclimatic interpretation of clay minerals in marine deposits: an outlook from the continental origin[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 49(1): 201-221.
- [5] WINKLER A, WOLF-WELLING T, STATTEGGER K, et al. Clay mineral sedimentation in high northern latitude deep-sea basins since the middle miocene (ODP Leg 151, NAAG) [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2002, 91(1): 133-148.
- [6] HONG H, CHURCHMAN G J, GU Y, et al. Kaolinite - smectite mixed-layer clays in the jiujiang red soils and their climate significance[J]. *Geoderma*, 2012, 173: 75-83.
- [7] DEEPTHY R, BALAKRISHNAN S. Climatic control on clay mineral formation: evidence from weathering profiles developed on either side of the Western Ghats[J]. *Journal of Earth System Science*, 2005, 114(5): 545-556.
- [8] 胡正义, 曹志洪. 我国南方地区典型土壤有机硫矿化速率及供硫潜力研究[J]. *中国农业科学*, 1999(6): 61-65.
- [9] 闫峰陵, 史志华, 蔡崇法, 等. 红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(4): 577-583.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [11] 李学垣. 土壤化学及实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [12] 李学垣, 徐凤琳. 湖北省丘岗、平原主要土壤的表面化学性质与粘粒的矿物、化学组成[J]. *华中农业大学学报*, 1999, 18(5): 420-426.
- [13] 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 粘土矿物的环境意义[J]. *地学前缘*, 2002(2): 337-344.
- [14] LICHTER J. Rates of weathering and chemical depletion in soils across a chronosequence of Lake Michigan sand dunes [J]. *Geoderma*, 1998, 85(4): 255-282.
- [15] JAIN M, TANDON S. Quaternary alluvial stratigraphy and palaeoclimatic reconstruction at the Thar margin[J]. *Curr Sci*, 2003, 84(8): 1048-1055.
- [16] 景冈. 土壤地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [17] 熊毅. 土壤胶体[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [18] 徐凤琳, 李学垣, 黄巧云. 鄂湘两省土地土壤粘粒矿物的研究 [J]. *土壤学报*, 1990, 27(3): 293-300.

Characteristics of clay minerals in the zonal soil from two kinds of parent rock

ZHANG Zhi-yi HUANG Li LU Sheng FU Qing-ling

Key Laboratory of Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract An investigation was made from north to south in china to study the soils' chemical and clay mineral composition characteristics of $< 2 \mu\text{m}$ clay. Four different types of soils (including brown earths, yellow-brown earths, red earths and humid-thermo ferralitic) developed from granite and gneiss were collected to find some clues to prove that climate conditions affect the composition of soil clay minerals in some degrees. The results showed that in brown earths, the clay minerals were mainly 2 : 1 type. Illite was a ubiquitous mineral, followed by vermiculite and kaolinite. A small amount of montmorillonite did exist. In yellow-brown earths, kaolinite and vermiculite occupied the main part, followed by illite and montmorillonite. In red earths, vermiculite and montmorillonite disappeared and was substituted by kaolinite, illite and 1.4 nm intergrade minerals. 1.4 nm intergrade minerals and vermiculite did not exist in the humid-thermo ferralitic. The content of kaolinite was up to 90%, followed by illite and a small amount of gibbsite. Annual average temperature and average rainfall were significantly positively correlated with kaolinite, and significantly negatively correlated with vermiculite and montmorillonite ($P < 0.05$).

Key words climate; granite; gneiss; clay minerals; the zonal soil