

九宫山土壤剖面中黏土矿物的组成特征^①

刘智杰, 董 雪, 张志毅, 黄 丽*

(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:以湖北省九宫山的 4 种垂直地带性土壤为对象, 研究其剖面层次的黏土矿物组合和铁、铝氧化物的特征, 揭示山地土壤中黏土矿物的变化特点。结果表明, 随海拔升高, 土壤中黏土矿物类型从以高岭石为主, 逐渐变为以 14.0Å 矿物、伊利石及三水铝石为主, 有从 1:1 型向 2:1 型矿物过渡的趋势; 不同层次的土壤中黏土矿物类型和相对含量变化明显; 土壤随垂直高程的升高, 其中游离态铁、铝减小, 非晶形和络合态铁、铝增加, 各种形态铁、铝氧化物的总量也增加。

关键词:九宫山; 地带性土壤; 剖面; 黏土矿物; 铁、铝氧化物

中图分类号:S151+.1; S151+.3 **文献标识码:**A

华中地区山地土壤种类繁多, 约占全区面积的 80%, 有巨大的生产潜力^[1]。随山地垂直地带分异, 不同土壤呈现出不同的剖面形态和理化性质, 对其黏土矿物的组成有较大的影响^[2]。黏土矿物是由各类母岩经过风化作用、蚀变作用或沉积作用而形成的产物^[3], 密切联系着土壤属性和土壤肥力特征^[4]。因此研究山地土壤的黏土矿物组成特点, 有助于揭示山地土壤的演化和资源分布规律, 对山地土壤资源保护和开发利用具有重要意义。

山地土壤中黏土矿物类型丰富, 呈现明显的垂直地带性分布, 随海拔升高, 环境温度降低, 土壤中 1:1 型黏土矿物含量减少, 2:1 型黏土矿物含量增加^[5]。关于华中地区大别山南坡土壤黏土矿物的研究表明, 随海拔升高, 土壤黏土矿物从高岭石、绿泥石转变为以高岭石、三水铝石为主, 直至全以三水铝石为主^[6]。而对于阿尔卑斯山不同层次的土壤剖面, A 层含有较多腐殖质, 能溶解绿泥石等矿物而形成较多高岭石和混层矿物; B 层黏土矿物相对百分含量变化不大; C 层属母质层, 风化较弱, 其较 A 层的高岭石含量低^[7-8]。华中地区幕阜山垂直带土壤剖面的研究表明, 幕阜山海拔 800 m 以下的红壤、山地红壤和黄红壤, 黏土矿物以高岭石为主, 海拔高于 800 m 的暗黄棕壤和山地灌丛草甸土, 黏土矿物以 2:1 型矿物为主^[9]。

目前, 有关山地土壤的研究较少且集中在其剖面

特征、黏土矿物组成及垂直分布等方面^[10-12]。九宫山地处幕阜山脉中段, 植被与土壤类型十分丰富, 且垂直分布明显。但由于山地土壤地形、母质和植被等的特殊性和复杂性, 关于土壤剖面中矿物的变化研究较少^[9]。为此, 我们以九宫山的几种垂直地带性土壤为材料, 研究其不同土壤剖面层次的黏土矿物组合和铁、铝氧化物的特征。为探索华中地区山地土壤黏土矿物的分布规律, 丰富土壤发生和演化理论等提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 取样概况

九宫山位于鄂赣两省交界处的幕阜山脉中段 (114°59'E, 29°23'N), 最高峰海拔 1 656 m, 年平均气温 22℃, 属亚热带湿润季风气候^[13]。本文选取从九宫山山脚到山顶的主要地带性土壤(基带棕红壤、山地黄红壤、山地黄棕壤和山地草甸土), 根据实际情况采集系列剖面样(主要为 A 层、B 层和 C 层), 共 11 个发生层次, 经风干、研磨、过筛后备用, 基本理化性状如表 1。

1.2 测定项目与方法

土壤理化性质的测定^[14]: 土壤有机质采用重铬酸钾-外加热法测定; pH 用电位法(水土比 1、2.5, 奥力龙 868 型 pH 计)测定; 土壤质地用吸管法测定

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

* 通讯作者(daisyh@mail.hzau.edu.cn)

作者简介: 刘智杰(1992—), 男, 山西临汾人, 硕士研究生, 主要从事土壤化学方面的研究。E-mail: 18935442641@163.com

表 1 供试土壤主要性状
Table 1 Descriptions of tested soils

土壤	编号	地理位置	海拔(m)	层次	深度(cm)	土色	母岩	植被利用
基带棕红壤	ZH-A	29°57'N	95	A	0~18	7.5YR 5/6	花岗岩	乔木、草本
	ZH-B	114°53'E		B	18~206	5YR 5/8		
	ZH-C			C	>206	7.5YR 6/8		
山地黄红壤	HH-A	29°24'N	654	A	0~26	10YR 4/3	花岗岩	灌木、草本、乔木
	HH-B	114°41'E		B	26~72	10YR 5/8		
	HH-C			C	>72	未采土样		
山地黄棕壤	HZ-A	29°24'N	1 266	A	0~24	7.5YR 3/4	花岗岩	草本、灌木
	HZ-B	114°40'E		B	24~49	10YR 4/3		
	HZ-C			C	>49	7.5YR 8/6		
山地草甸土	CD-A	29°23'N	1 434	A	0~20	7.5YR 2/2	片麻岩	次生灌木、草本
	CD-B	114°39'E		B	20~36	10YR 5/8		
	CD-C			C	>36	2.5YR 6/3		

(采用国际制土壤质地分类系统);阳离子交换量用 NH_4OAc 浸提法测定;交换性钾、钠用 NH_4OAc 浸提火焰光度法测定;交换性钙、镁用 NH_4OAc 浸提原子吸收法测定(AAS;FAAS-240型)。

铁、铝氧化物的测定:游离态铁、铝采用 DCB(柠檬酸钠-重碳酸钠-连二亚硫酸钠)法提取,非晶形铁、铝用草酸铵缓冲液提取,络合态铁、铝用焦磷酸钠溶液(内含 10% Na_2SO_4 , pH 10.0)提取,等离子发射光谱(ICP;VISTA-MPX 型)测定铁、铝的含量。

黏粒的分离与提取:土样用过氧化氢去除有机质,用少量 0.5 mol/L 的 NaOH 调节土壤悬液至 pH 为 7~8,并经超声波分散处理后,用沉降法分离 <2 μm 黏粒。

黏土矿物鉴定:沉降法提取 <2 μm 的黏粒,DCB 脱铁处理后,分别制成镁-甘油饱和定向片和钾饱和定向片后进行 X 射线衍射(XRD)(Bruker D8 Advance)分析。钾饱和定向片,根据需要,依次加热至 300

和 550 $^{\circ}\text{C}$,恒温 2 h 后再进行衍射扫描。测试条件为: $\text{CuK}\alpha$ (铜靶)辐射,管压 40 kV,管流 40 mA,步进扫描,速度为 10 $^{\circ}$ /min,步长 0.01 $^{\circ}$,扫描 2 θ 范围为 3 $^{\circ}$ ~35 $^{\circ}$ 。

1.3 数据处理

试验数据采用 Microsoft office 2003 和 Origin9.0 处理。黏土矿物半定量分析采用 XRD 图谱中的峰面积进行估算^[15-16]: MgCl_2 -甘油饱和片衍射图谱使用 Jade 软件平滑和扣除背景值后,计算各矿物特征衍射峰的积分面积,并乘以其比例系数(蛭石/绿泥石 $\times 2$, 14.0 $\text{\AA}$ 过渡矿物 $\times 2$, 12.0 $\text{\AA}$ 过渡矿物 $\times 2$,伊利石 $\times 3.5$, 高岭石 $\times 2$,三水铝石 $\times 1$),再分别计算各特征峰的面积占总面积的百分数。

2 结果与讨论

2.1 土壤的基本理化性质

供试土壤发育于片麻岩和花岗岩,植被利用方式以灌木和草本为主,垂直分布明显(表 1)。pH(表 2)

表 2 供试土壤基本理化性质
Table 2 Basic physical and chemical properties of tested soils

编号	层次	pH	有机质 (g/kg)	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CEC	黏粒含量 (g/kg)	质地
				(cmol(+)/kg)						
ZH-A	A	5.11	19.64	0.22	0.13	1.83	0.32	8.27	194.7	粉壤
ZH-B	B	4.97	6.24	0.18	0.18	0.78	0.19	19.93	481.8	重黏土
ZH-C	C	5.22	3.23	0.14	0.16	0.77	0.52	12.18	262.6	粉黏壤
HH-A	A	4.81	47.87	0.21	0.11	0.75	0.18	15.81	227.1	粉黏壤
HH-B	B	4.94	12.12	0.08	0.09	0.22	0.06	11.78	209.2	粉黏壤
HZ-A	A	4.42	84.32	0.20	0.16	0.44	0.10	28.68	170.9	砂黏壤
HZ-B	B	5.27	12.63	0.11	0.13	0.18	0.08	15.15	322.5	砂黏土
HZ-C	C	5.00	3.88	0.10	0.15	0.26	0.05	5.57	184.9	粉壤
CD-A	A	4.54	90.03	0.21	0.16	0.40	0.07	22.64	225.0	粉黏壤
CD-B	B	4.93	30.21	0.15	0.16	0.51	0.06	14.74	174.5	粉壤
CD-C	C	4.99	16.91	0.12	0.16	0.34	0.04	8.57	140.7	粉壤

变化范围为 4.42 ~ 5.27, 均呈酸性。整体看来, 随海拔升高, 土壤酸化程度增加。不同层次土壤中, A 层、B 层和 C 层土壤有机质含量变化范围分别为 19.64 ~ 90.03、6.24 ~ 30.21 和 3.23 ~ 16.91 g/kg, 有 A 层 > B 层 > C 层的规律。可见, 随土壤深度增加, 土壤有机质含量降低。对于海拔高度不同的土壤, 基带棕红壤的有机质含量最低, 为 3.23 g/kg; 草甸土的有机质含量最高, 为 90.03 g/kg。可见, 随海拔升高, 土壤有机质含量逐渐增加, 这可能主要与海拔升高时植被类型的变化及气温降低, 微生物活动减弱有关^[9]。

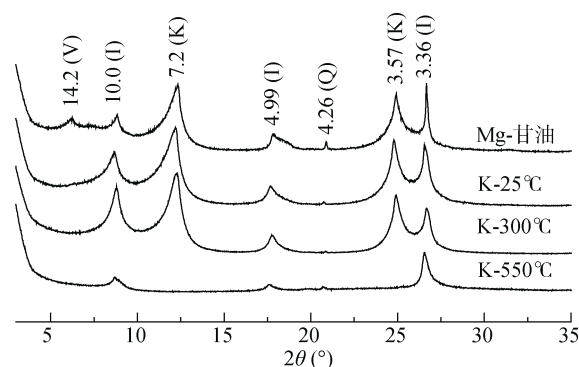
从山脚到山顶, 棕红壤、黄红壤、黄棕壤和草甸土的阳离子交换量逐渐减小, 其变幅分别为 8.27 ~ 19.93、11.78 ~ 15.81、5.57 ~ 28.68 和 8.57 ~ 22.64 cmol(+)/kg。可能因为随海拔升高, 降雨量增加, 淋溶作用变强, 导致土壤的阳离子含量降低^[17]。同一剖面不同层次的土壤, 阳离子交换量有 A 层 > B 层 > C 层的规律, 其中表层的较高, 这与表层土壤丰富的有机质有关。土壤交换性钾和钠的含量随海拔高度的变化不明显, 变化范围仅为 0.08 ~ 0.22 cmol(+)/kg, 而土壤交换性钙和镁的含量随海拔升高逐渐减小。不同层次土壤中, 交换性钾的含量为 A 层 > B 层 > C 层; 交换性钠的含量随层次变化不明显; 交换性钙的含量 A 层普遍大于 B、C 层; 交换性镁含量为 A 层 > B 层 > C 层(除位于基带的棕红壤外)。不同类型的土壤中, 随海拔升高, 土壤中黏粒含量逐渐减少, 质地由重黏土和粉黏壤过渡到粉壤, 这与温绣娟等^[18]的研究结果一致。

2.2 黏土矿物组合的变化

2.2.1 黏土矿物组成

同一类型土壤不同层次的 XRD 图谱比较相似, 所以选取具有代表性的 B 层土壤样品(<2 μm)的 XRD 图谱进行分析。棕红壤 B 层样品的镁-甘油饱和图谱(图 1)中出现 14.2、10.0、7.2、4.99、4.26、3.57 和 3.36 Å 的衍射峰。而 K-25 图谱中 14.2 Å 的衍射峰消失, 10.0 Å 峰增强, 表明棕红壤中含有蛭石; 所有处理的 XRD 图谱中皆存在 10.0、4.99 和 3.36 Å 的衍射峰, 其钾饱和片经加温处理后稳定性极好, 表明伊利石的存在; K-550 图谱中 7.2 和 3.57 Å 的衍射峰消失, 表明黏土矿物中有高岭石。高岭石 7.2 Å 衍射峰极度不对称, 存在向低角度区域拖尾的现象, 说明棕红壤黏粒中存在高岭石-2:1 型黏土矿物的间层矿物(KIMs), 可能是高岭石-蛭石或高岭石-伊利石间层矿物, 表明黏粒中高岭石结晶度较差^[19-20]。各衍射图谱在 4.26 Å 处均出现了微弱的衍射峰, 且较稳定, 说明棕红壤中存在少量石英。棕红壤

的黏土矿物类型较简单, 主要为高岭石和伊利石及少量蛭石。

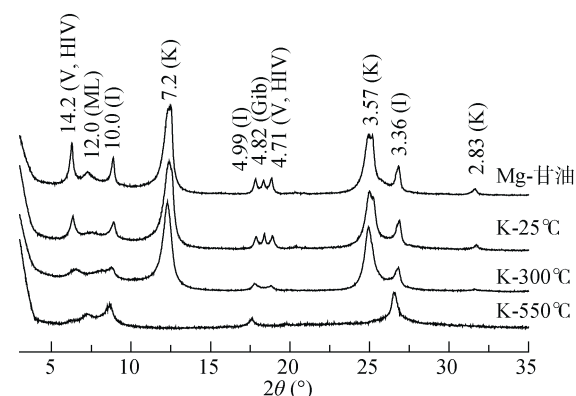


(V: 蛭石; I: 伊利石; K: 高岭石; Q: 石英; Mg-甘油为镁-甘油饱和处理; K-25 为常温下钾饱和处理; K-300、K-550 分别为钾饱和加温 300 和 550 的处理, 下同)

图 1 基带棕红壤的 X 射线衍射图谱

Fig. 1 XRD patterns of baseband brown red soil in Jiugong Mountain

山地黄红壤的镁-甘油饱和图谱(图 2)中出现 14.2、12.0、10.0、7.2 Å 的衍射峰。K-25 图谱中, 14.2 Å 的峰有所减弱但并未消失, 表明含蛭石; 当钾饱和片加温到 300 后, 12.0 Å 的峰消失, 说明山地黄红壤中所含的混层矿物类型为蛭石-伊利石; K-300 图谱中, 14.2 Å 峰进一步减弱, 并且 10.0 Å 峰变宽, 表明含有 14.0 Å 过渡矿物; K-550 图谱中, 14.2 Å 峰全部收缩成 12.0 Å 峰, 说明黏土矿物中不存在绿泥石; 其中 10.0、7.2 和 2.83 Å 衍射峰的出现显示伊利石和高岭石的存在。在镁-甘油饱和图谱出现 4.82 Å 峰, 而 K-300 图谱中 4.82 Å 峰消失, 表明黏土矿物中有三水铝石。与基带棕红壤相比, 山地黄红壤的矿物更加丰富, 除了高岭石、伊利石、蛭石和 14.0 Å 过渡矿物, 还存在 12.0 Å 混层矿物及少量三水铝石。



(V: 蛭石; HIV: 14.0 Å 过渡矿物; ML: 混层矿物; I: 伊利石; K: 高岭石; Gib: 三水铝石, 下同)

图 2 山地黄红壤的 X 射线衍射图谱

Fig. 2 XRD patterns of mountain yellow-red soil in Jiugong Mountain

山地黄棕壤的镁-甘油饱和片图谱(图 3)显示 14.2、10.0、7.2、4.82Å 的衍射峰。K-25 图谱中, 14.2Å 的衍射峰没有收缩,但 K-300 图谱中,14.2Å 的衍射峰向 10.0Å 峰收缩移动,形成了一个 12.0Å 的过渡峰,而 K-550 图谱中,14.2Å 峰不消失,12.0Å 峰消失,表明山地黄棕壤中的 14.2Å 矿物含有绿泥石和 14.0Å 过渡矿物。10.0、7.2 和 4.82Å 衍射峰的存在显示黏土矿物中含有伊利石、高岭石和三水铝石。可见,山地黄棕壤主要存在 14.0Å 矿物,其次为高岭石、三水铝石和伊利石。与山地黄红壤相比,黄棕壤中没有出现 12.0Å 混层矿物。

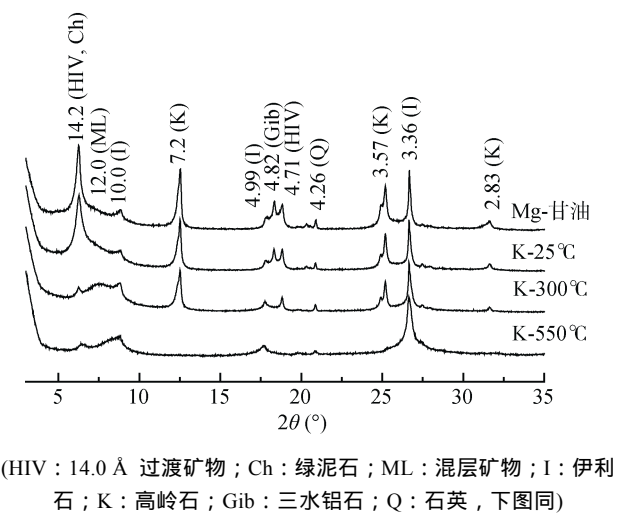


图 3 山地黄棕壤的 X 射线衍射图谱

Fig. 3 XRD patterns of mountain yellow-brown soil in Jiugong Mountain

山地草甸土的镁-甘油饱和图谱中出现 14.2、12.0 和 4.82Å 的衍射峰, K-25 图谱中, 14.2Å 衍射峰不消失,但衍射峰强度有所减弱,说明草甸土中含有蛭石。K-300 图谱中, 14.2Å 的衍射峰向 10.0Å

偏移,形成了一个宽峰,加温到 550 后,14.2Å 峰有所减弱,但不消失,说明草甸土中的 14.2Å 矿物同时含有绿泥石、蛭石和 14.0Å 过渡矿物^[21]。但当钾饱和片加温到 300 后, 12.0Å 衍射峰消失,说明山地草甸土中含有 12.0Å 混层矿物,可能含有蛭石-伊利石和绿泥石-伊利石两种混层矿物。10.0、7.2 和 4.82Å 衍射峰加温后的变化说明黏土矿物中还含有伊利石、高岭石和三水铝石。这表明山地草甸土黏土矿物种类更为复杂,同时含有绿泥石、蛭石和 14.0Å 过渡矿物、12.0Å 混层矿物、伊利石、高岭石和三水铝石。

2.2.2 黏土矿物的相对含量 棕红壤的黏土矿物类型较单一,主要为高岭石和伊利石(表 3)。从 A 层到 C 层,土壤中 14.0Å 矿物(蛭石)的含量减少,高岭石的含量增加,而伊利石的含量有 B 层>A 层>C 层的趋势。其中 ZH-A 含有少量的三水铝石,仅为 2%;并且 ZH-A 和 ZH-B 还含有少量的蛭石,分别为 7% 和 6%;ZH-C 的矿物类型最简单,仅含高岭石和伊利石,但高岭石含量高达 94%。

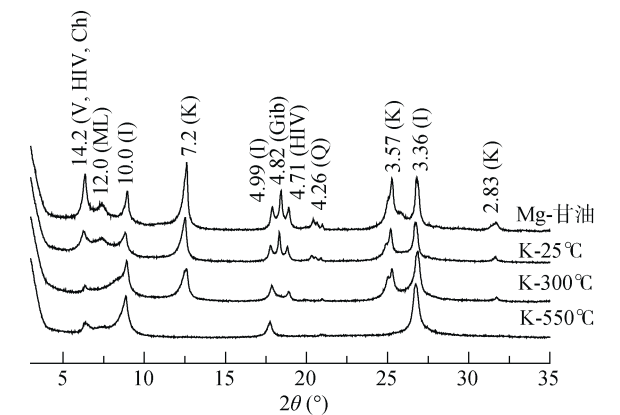


图 4 山地草甸土的 X 射线衍射图谱

Fig. 4 XRD patterns of mountain meadow soil in Jiugong Mountain

表 3 土壤中黏土矿物类型及相对含量(%)
Table 3 Types and relative contents of clay minerals in tested soils in Jiugong Mountain

编号	14.0Å 矿物	12.0Å 混层矿物	伊利石	高岭石	三水铝石
ZH-A	7	0	13	78	2
ZH-B	6	0	16	78	0
ZH-C	0	0	6	94	0
HH-A	18	5	18	56	3
HH-B	18	0	20	58	4
HZ-A	65	0	10	14	11
HZ-B	67	0	10	15	8
HZ-C	19	0	16	13	52
CD-A	33	0	44	20	3
CD-B	25	7	33	23	12
CD-C	36	0	26	20	18

山地黄红壤的黏土矿物类型随层次的变化不大,其黏土矿物主要有高岭石、伊利石、14.0Å 矿物(蛭石和 14.0Å 过渡矿物)和少量三水铝石。相比棕红壤,在 HH-A 层还出现少量 12.0Å 混层矿物,含量约为 5%。

山地黄棕壤黏土矿物种类随土壤剖面层次的变化较大,其中 HZ-A 和 HZ-B 的主要黏土矿物为 14.0Å 矿物(14.0Å 过渡矿物和绿泥石),其含量均高于 65%,其次为高岭石、三水铝石和伊利石。而 HZ-C 的主要黏土矿物为三水铝石和 14.0Å 矿物,其中三水铝石含量百分比高达 52%。

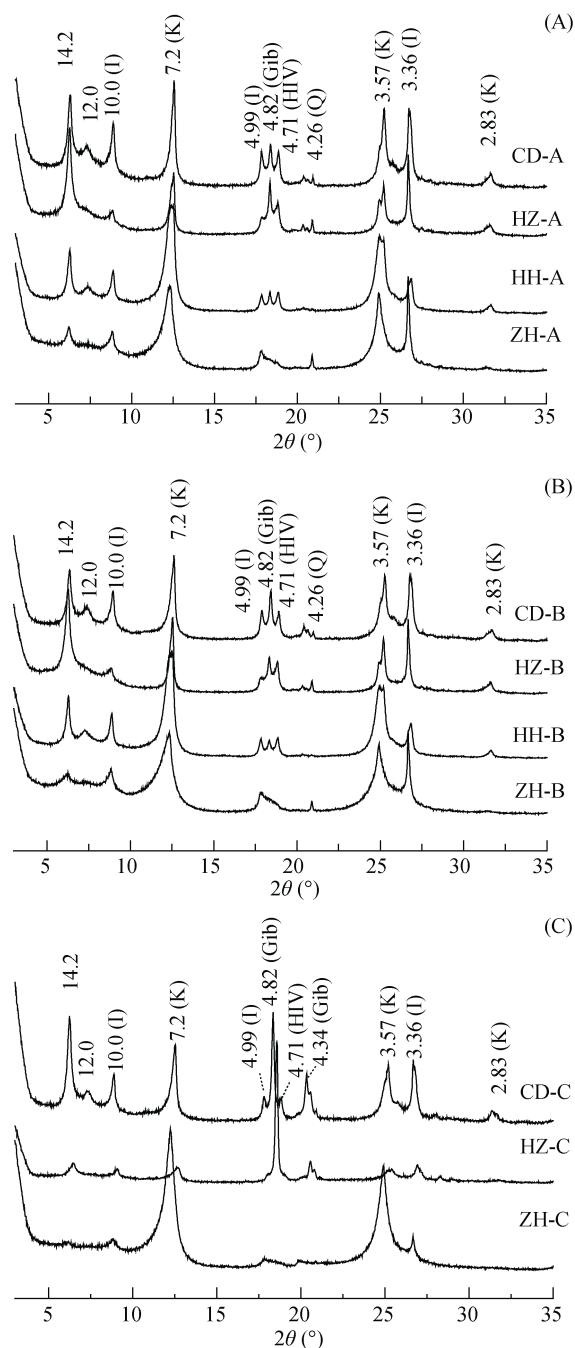
山地草甸土黏土矿物主要以 14.0Å 矿物(蛭石、14.0Å 过渡矿物和绿泥石)和伊利石为主,其含量百分比在 25%~40% 之间,且在 CD-A 层中伊利石含量超过 40%。其次是高岭石,其含量随土壤层次变化不明显,变化范围仅为 20%~23%。不同剖面层次土壤的三水铝石含量差别较大,CD-B 和 CD-C 分别为 12% 和 18%,而 CD-A 的三水铝石含量较 CD-B 和 CD-C 少,仅为 3%。整体来看,山地草甸土矿物类型随剖面层次的变化不大,但 B 层矿物类型较 A 层和 C 层复杂,还含有 7% 的 12.0Å 混层矿物。山地草甸土的黏土矿物随剖面层次的变化与山地黄棕壤的一致。

不同剖面间比较发现,九宫山土壤不同层次中,黏土矿物类型和相对含量发生明显变化。对于基带棕红壤的不同层次,在剖面 A、B 层中含有少量的 14.0Å 矿物和三水铝石,在母质层中伊利石含量减少,高岭石含量增加,这是因为该地棕红壤发育于花岗岩,花岗岩中含有大量难以风化的石英,且该地土层深厚,母质抗风化能力强,所以土壤表层中高岭石含量较低。而山地黄红壤不同层次间黏土矿物含量相似,没有明显变化。相比基带棕红壤,山地黄棕壤和山地草甸土,在剖面 A、B 层中 14.0Å 矿物和三水铝石含量有所提高,而高岭石含量有所降低,母质层中三水铝石含量明显增加。同一山体不同土壤剖面黏土矿物变化规律的差异性,主要是受海拔高度、气候(包括生物气候条件)、母岩、植被等因素的影响^[6]。

九宫山土壤中三水铝石含量随层次的变化与高岭石的规律相反,且三水铝石含量随海拔升高而增加,这与 2:1 型矿物的含量变化有相同趋势,推断九宫山土壤中三水铝石的形成除经过高岭石阶段,还可以通过斜长石的直接风化,其数量的多少由花岗岩和片麻岩中斜长石含量的多少决定^[9]。随山体海拔增加,土壤中 14.0Å 矿物含量增加,关于 14.0Å 矿物组成的变化,低海拔土壤中蛭石相对较多,14.0Å 过渡矿物较少,高海拔土壤中 14.0Å 过渡矿物增加,蛭石

减少,且有少量绿泥石出现。

2.2.3 剖面中黏土矿物随海拔的变化 土壤黏土矿物随山体海拔高度的变化,呈有规律分布。随海拔升高,不同的 A 层土壤中 14.2 和 4.82Å 的衍射峰逐渐增强(图 5A),而高岭石的 7.2 和 3.57Å 衍射峰逐渐



(HIV: 14.0 Å 过渡矿物; I: 伊利石; K: 高岭石; Gib: 三水铝石; Q: 石英; CD: 山地草甸土; HZ: 山地黄棕壤; HH: 山地黄红壤; ZH: 基带棕红壤; A、B 和 C 分别代表土壤剖面的 A 层、B 层和 C 层)

图 5 不同海拔高度土壤镁-甘油饱和片的 X 射线衍射图谱
Fig. 5 XRD patterns of magnesium-glycerol saturated soils at different altitudes in Jiugong Mountain

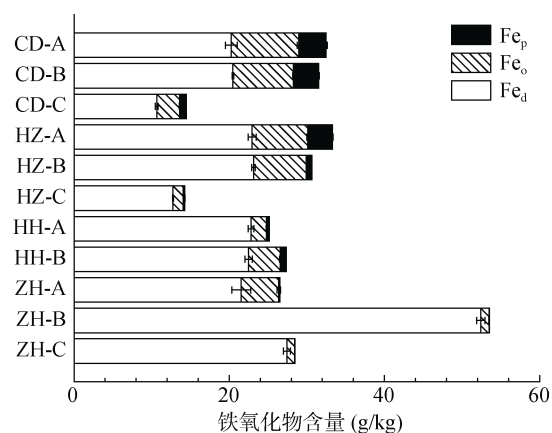
减弱,说明 $14.0\text{\AA}$ 矿物和三水铝石在黏土矿物中所占比重逐渐增加,高岭石所占比重逐渐减小。即随海拔升高,A 层土壤中的黏土矿物从以高岭石为主逐渐变为以 $14.0\text{\AA}$ 矿物和三水铝石为主,表明 A 层土壤层间 2:1 型矿物的淋溶脱钾和羟基铝化作用随海拔升高逐渐增强。这与已有研究结果类似^[5]。除山地黄棕壤 A 层土壤以外,其他 3 种土壤伊利石的衍射峰 (10.0 、 4.99 和 $3.36\text{\AA}$)随海拔升高而增强,表明随海拔升高,1:1 型矿物含量减少,2:1 型矿物含量增多,这与黏粒阳离子交换量的变化相吻合。而黄棕壤的结果不同,可能与当地的气候和生物条件以及成土过程有关,成土过程中矿物组成的变化受植被原生演替和土壤 pH 的影响较大^[22]。不同海拔高度 B 层土壤黏土矿物(图 5B)的变化与 A 层一致。而 3 种土壤 C 层的黏土矿物随海拔高度变化最为明显,不仅 $14.0\text{\AA}$ 矿物和伊利石含量增加,高岭石含量减少,而且三水铝石含量明显增多,尤其是山地黄棕壤 C 层的三水铝石含量最多,可能是该地表层土壤经淋溶作用羟基铝淀积在 C 层,进而形成三水铝石。在不同海拔高度土壤的 XRD 衍射图谱中,高岭石衍射峰的形状随海拔升高,由极度不对称逐渐过渡到对称,且由矮宽逐渐变得高窄,说明海拔越高,高岭石的结晶度越高^[23]。

从黏土矿物组合来看,随山体海拔升高,环境温度的降低,有从 1:1 型向 2:1 型过渡的趋势,这与水平带土壤随纬度北移相同。主要表现为高岭石含量减少,伊利石和 $14.0\text{\AA}$ 矿物含量增加,同时部分土壤出现 $12.0\text{\AA}$ 混层矿物。表明土壤发育程度随海拔的升高而减弱,这与土壤基本理化性质和黏粒化学组成的变化相符。并且随着海拔高度的增加,黏土矿物从以高岭石、伊利石为主变为以 $14.0\text{\AA}$ 矿物和三水铝石为主,可能是因为海拔愈高,淋溶作用增强,脱硅富铝化作用愈强烈的缘故^[6]。

2.3 铁、铝氧化物的特征

供试土壤黏粒的游离铁含量(Fe_d)为 $10.67 \sim 52.42 \text{ g/kg}$,非晶质铁(Fe_o)和络合态铁(Fe_p)的含量分别为 $0.99 \sim 8.70 \text{ g/kg}$ 和 $0.02 \sim 3.53 \text{ g/kg}$ (图 6)。在土壤垂直带谱中,发育于不同海拔下的土壤剖面之间铁氧化物含量存在明显差异。海拔低处的棕红壤黏粒中游离铁含量最高($27.45 \sim 52.42 \text{ g/kg}$),海拔高处的山地黄棕壤和草甸土黏粒中游离铁含量最低($10.67 \sim 23.13 \text{ g/kg}$);而非晶质铁和络合态铁,以棕红壤黏粒中的含量最低(分别为 $0.99 \sim 4.83 \text{ g/kg}$ 和 $0.02 \sim 0.16 \text{ g/kg}$),山地草甸土黏粒中的含量最高(分别为 $2.94 \sim 8.70 \text{ g/kg}$ 和 $0.84 \sim 3.53 \text{ g/kg}$)。这说明,随海拔升高,游离铁

含量略微减少,非晶形和络合态铁含量逐渐增加,这与刘凡等^[5]的研究结果一致。这可能是因为山地垂直地带性土壤中,随着海拔的升高,气温降低,降雨量和湿度及土壤有机质含量明显增高,促进其铁氧化物溶解、螯合而导致海拔高处土壤中有较高含量的无定形铁。



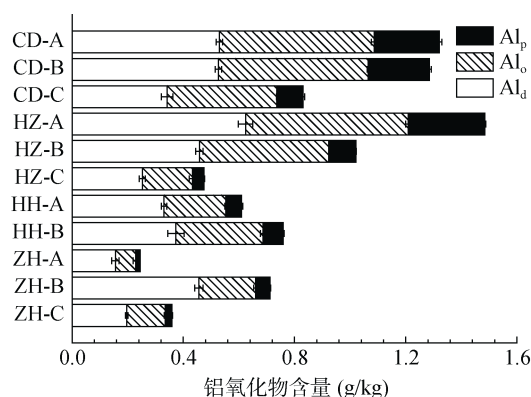
(Fe_p : 络合态铁; Fe_o : 非晶形铁; Fe_d : 游离铁; CD: 山地草甸土; HZ: 山地黄棕壤; HH: 山地黄红壤; ZH: 基带棕红壤; A、B 和 C 分别代表土壤剖面 A 层、B 层和 C 层)

图 6 不同形态铁氧化物的含量
Fig. 6 Contents of iron oxides in different forms in tested soils in Jiugong Mountain

不同形态的铁氧化物在不同土壤层次中占的比例不同,百分含量最大的是游离态铁,其次是非晶形铁,而络合态铁的相对含量最少。除 ZH-B 以外,其他土壤中 3 种形态铁氧化物的总量大体随海拔升高而增加,这与土壤随纬度北移相同^[24]。ZH-B 土壤中各种形态铁氧化物的总量较大,可能因为同一剖面不同层次的土壤,A 层土壤的游离铁易被淋溶而淀积在 B 层,导致 B 层游离铁含量增加。

黏粒中游离铝(Al_d)的含量为 $0.16 \sim 0.62 \text{ g/kg}$,非晶质铝(Al_o)的含量为 $0.1 \sim 0.59 \text{ g/kg}$,络合态铝(Al_p)的含量为 $0.02 \sim 0.28 \text{ g/kg}$ (图 7)。从相同剖面上看,随着剖面深度的增加,各种形态铝氧化物的含量呈降低的趋势(棕红壤除外)。这是因为不同层次的土壤剖面中,表层(A 层)的铁、铝更易淋溶淀积在 B 层,造成 B 层的游离铁、铝含量增高。C 层属母质层,其风化较弱,游离铁、铝的含量较 A 层的低。

土壤中各形态铝氧化物的总量随海拔升高而增大,这与铁氧化物的规律一致。整体来看,随海拔的升高,土壤 pH 降低,土壤中的 Al^{3+} 含量和羟基铝(游离铝、非晶质铝和络合态铝)都有逐渐升高的趋势,表现出明显的富铝化特征,这与三水铝石随海拔高度



(Al_p: 络合态铝; Al_o: 非晶形铝; Al_u: 游离铝; CD: 山地草甸土; HZ: 山地黄棕壤; HH: 山地黄红壤; ZH: 基带棕红壤; A、B 和 C 分别代表土壤剖面 A 层、B 层和 C 层)

图 7 不同形态铝氧化物的含量

Fig. 7 Contents of aluminum oxides in different forms in tested soils in Jiugong Mountain

的升高而含量增加的结果一致。且 Al³⁺ 和羟基铝进入 2:1 型膨胀性矿物(主要是蛭石)的层间, 从而形成 14.0Å 过渡矿物^[25]。但随海拔的升高, 游离态铝占铝氧化物总量的百分比减小, 络合态和非晶形铝所占百分比增加, 说明海拔低处的铝氧化物以游离态为主, 海拔高处的以络合态和非晶形铝为主。

3 结论

九宫山垂直地带性土壤中黏土矿物组合垂直变化明显, 随山体海拔升高, 高岭石含量逐渐减少, 14.0Å 矿物、伊利石及三水铝石的含量逐渐增加, 部分土壤出现 12.0Å 矿物混层, 且其各种形态铁、铝氧化物的含量大体随海拔高度的升高而增大。山地土壤黏土矿物的垂直变化与剖面中不同层次的土壤风化程度有密切的关系。随海拔升高, 土壤质地变轻, 2:1 型黏土矿物增加, 黏粒的游离态铁、铝的含量减小, 非晶形和络合态铁、铝的含量增加, 都反映了九宫山垂直带谱中土壤的风化程度从低海拔到高海拔逐渐降低。

九宫山土壤不同层次中, 黏土矿物类型和相对含量发生变化。基带棕红壤剖面 A 层和 B 层具有较多 14.0Å 矿物和伊利石, 而 C 层具有大量高岭石; 山地黄红壤的黏土矿物类型和含量随层次的变化不大; 和基带棕红壤相比, 山地黄棕壤和山地草甸土剖面 A、B 层中 14.0Å 矿物和三水铝石含量明显提高, 高岭石含量明显降低, 而 C 层中三水铝石含量增加最为明显。垂直土壤的不同层次中, A 层和 B 层的铁、铝氧化物含量均较 C 层的高。

参考文献:

- [1] 李庆远. 中国红壤[M]. 北京: 科学出版社, 1983
- [2] 焦琰, 王学东, 黄磊, 等. 雾灵山土壤垂直分布类型及其剖面特征[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 69-72
- [3] 路鹏, 周超, 陈圣波, 等. 基于 Hyperion 数据的江西德兴矿区粘土矿物信息提取及其找矿意义[J]. 中国地质大学学报(地球科学), 2015, 40(8): 1386-1390
- [4] 张志丹, 罗香丽, 王继红, 等. 吉林省主要土壤胶散复合体粘土矿物 XRD 物相研究[J]. 矿物学报, 2016, 36(1): 97-102
- [5] 刘凡, 徐凤琳, 李学垣. 鄂湘两省山地土壤粘粒矿物的研究. III 神农架自然保护区北坡土壤的粘粒矿物与表面化学特性[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 59-69
- [6] 刘自清, 龙成凤. 大别山南坡土壤粘粒矿物的垂直分布[J]. 土壤, 1990, 3(9): 9-12
- [7] Uzarowicz L, Skiba S, Skiba M, et al. Clay-mineral formation in soils developed in the weathering zone of pyrite-bearing schists: a case study from the abandoned pyrite mine in wiesciszowice, lower silesia, sw Poland[J]. Clays and Clay Minerals, 2011, 59(6): 581-594
- [8] Mavris C, Plötze M, Mirabella A, et al. Clay mineral evolution along a soil chronosequence in an Alpine proglacial area[J]. Geoderma, 2011, 165: 106-117
- [9] 胡红青, 徐凤琳, 李学垣. 幕阜山土壤的粘粒矿物与土壤形成[J]. 华中农业大学学报, 1993, 12(4): 347-352
- [10] 胡少宜. 福建漳浦金刚山土壤主要属性的垂直分布特点[J]. 土壤, 1998, 30(1): 8-10
- [11] 李军, 张杨珠, 赵荣进, 等. 蓝山县山地土壤发生特性与系统分类研究[J]. 湖南农业科学, 2013(5): 45-52
- [12] 许慧琼. 基于武夷山土壤垂直分异规律的红壤和黄壤性状特征比较[J]. 安徽农业通报, 2014, 20(23): 64-66
- [13] 汪洪旭. 旅游干扰对九宫山景区土壤养分、微生物群落结构及酶活性的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2014, 45(5): 735-740
- [14] 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
- [15] Brindley G W. Quantitative X-ray mineral analysis of clays // Brindley G W, Brown G. Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification[M]. London: Mineralogical Society, 1980: 411-438
- [16] 刘莉红, 胡雪峰, 叶玮, 等. 皖南第四纪红土伊利石结晶度值与风化强度的关系[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 991-998
- [17] 张志毅, 黄丽, 卢胜, 等. 2 种母岩发育的地带性土壤中粘土矿物的组成特点[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(3): 1-8
- [18] 温绣娟. 武夷山土壤粒径分布特征及其可蚀性研究[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2013, 12(3): 130-134
- [19] Zhang Z Y, Huang L, Liu F, et al. Characteristics of clay minerals in soil particles of two Alfisols in China[J]. Applied Clay Science, 2015, 120: 51-60
- [20] 洪汉烈, 杜登文, 李荣彪, 等. 安徽宣城红土剖面中粘土矿物过渡相及其意义[J]. 中国地质大学学报, 2012, 37(3): 424-431

- [21] 张志春, 潘根兴, 孔尚成, 等. 青藏高原三江源南部下拉秀剖面粘土矿物组合特征及其环境意义[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 181–186
- [22] 杨子江, 邴海健, 周俊, 等. 贡嘎山海螺沟冰川退缩区土壤序列矿物组成变化[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 507–514
- [23] 许乃岑, 沈加林, 骆宏玉. X射线衍射和红外光谱法分析高岭石结晶度[J]. 资源调查与环境, 2014, 35(2): 152–156.
- [24] 卢胜, 张志毅, 黄丽, 等. 花岗岩和片麻岩发育土壤性状的水平地带性分异[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 272–279
- [25] 黄丽, 刘凡, 谭文峰, 等. 几种亚热带淋溶土基质和胶膜中 1.4 nm 过渡矿物组成的差异及其意义[J]. 矿物学报, 2002, 22(4): 315–319

Characteristics of Clay Minerals in Soil Profiles of Jiugong Mountain

LIU Zhijie, DONG Xue, ZHANG Zhiyi, HUANG Li*

(Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River),
Ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The composition characteristics of clay minerals and iron-aluminum oxides at different horizons of soil profiles in the vertical zonal soils of the Jiugong Mountain in Hubei Province were studied to reveal the changes of clay minerals in mountain soils. The results indicated that the content of kaolinite was abundant in soil at lower altitude, whereas the majority was 14.0Å minerals, illite and gibbsite at higher altitude. With the increase of altitude, there was a transition trend of clay minerals from 1:1 to 2:1 types. The changes of types and relative contents of clay minerals in soils were obvious at different horizons in soil profiles. With the increase of altitude, the contents of free iron-aluminum oxides decreased but those of amorphous and complex iron-aluminum oxides increased in clays, and the total amounts of iron-aluminum oxides in different forms were also increased.

Key words: Jiugong Mountain; Zonal soil; Soil profile; Clay minerals; Iron-aluminum oxides