

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.06.025

欧锦琼, 黄伟濠, 卢瑛, 等. 广西水耕人为土黏粒矿物组成及其空间分布特征. 土壤, 2020, 52(6): 1290–1297.

广西水耕人为土黏粒矿物组成及其空间分布特征^①

欧锦琼, 黄伟濠, 卢瑛*, 李 博, 阳 洋, 唐 贤, 贾重建, 秦海龙

(华南农业大学资源环境学院/广东省土地利用与整治重点实验室, 广州 510642)

摘 要: 黏粒矿物影响着土壤理化性质, 可指示成土因素特征和土壤发生发育过程/强度, 也是中国土壤系统分类的基层单元土族矿物学类型划分的重要依据。本研究选择了广西不同纬度和成土母质的 18 个代表性水耕人为土的剖面, 应用 X 射线衍射(XRD)方法分析了其典型水耕氧化还原层(Br 层)的黏粒矿物组成及其空间分布特征, 并确定了其中“黏质”剖面的土族控制层段矿物学类型。结果表明: ①供试土壤的黏粒矿物主要包括高岭石、伊利石、三水铝石、1.42 nm 过渡矿物、蒙脱石和蛭石等, 依次分别出现在 100%、88.9%、72.2%、61.1%、44.4% 和 38.9% 的剖面中。②黏粒矿物组成在纬度空间分布上具有明显规律性特征。随着纬度降低, 土壤黏粒中的高岭石增加, 伊利石、蒙脱石、1.42 nm 过渡矿物逐渐减少; 纬度 > 23°N 区域内, 成土母质对黏粒矿物组成影响明显。③纬度 23°N 是黏粒矿物组成和土族矿物学类型分界线, < 23°N 区域, 黏粒矿物均以高岭石为主, 是“黏质”剖面的土族控制层段的主要矿物学类型; > 23°N 区域, 黏粒矿物组成以高岭石、蒙脱石、伊利石或 1.42 nm 过渡矿物为主, 因成土母质不同而异, “黏质”剖面的土族控制层段矿物学类型包括高岭石混合型、混合型和伊利石型。

关键词: 水耕人为土; 黏粒矿物; 空间分布; 土族矿物学类型; 广西

中图分类号: S151 **文献标志码:** A

Clay Mineral Composition and Spatial Distribution of Stagnic Anthosols in Guangxi

OU Jinqiong, HUANG Weihao, LU Ying*, LI Bo, YANG Yang, TANG Xian, JIA Chongjian, QIN Hailong

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University/Guangdong Provincial Key Laboratory of Land Use and Consolidation, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Clay minerals in soil affect soil physicochemical properties, indicate soil-forming factor characteristics, soil genesis process and intensity, and is important to distinguish mineralogy classes of soil family in Chinese Soil Taxonomy. In this paper, 18 soil profiles of Stagnic anthosols derived from different parent materials in different latitudes in Guangxi were investigated, clay mineral compositions and spatial distribution in hydric horizon (Br) of each profile was analyzed by X-ray diffraction (XRD) and applied to distinguish mineralogy classes for soil family classification of clayed soil profiles. The results showed that: 1) clay minerals in Stagnic anthosols in Guangxi mainly consisted of kaolinite, illite, montmorillonite, gibbsite, vermiculite and 1.42 nm intergradient minerals. The percent of occurrence of kaolinite, illite, gibbsite, 1.42 nm intergradient minerals, montmorillonite and vermiculite were 100%, 88.9%, 72.2%, 61.1%, 44.4% and 38.9% respectively. 2) the composition of clay minerals has obvious regularity in latitude spatial distribution, with the increase of altitude, relative percentage of kaolinite decreased, while frequency of occurrence and relative percentage of illite, montmorillonite or 1.42 nm intergradient minerals increased. Parent materials obviously affected clay mineral composition in soils in the north area of 23°N latitude. 3) Latitude 23°N was dividing-line of clay mineral composition and mineralogy classes. In the south area of 23°N latitude, clay mineral composition in soils with different parent materials was dominated by kaolinite, mineralogy classes for the identification of soil families of clayed soil profiles was kaolinitic or kaolinitic mixed. In the north area of 23°N latitude, clay mineral composition dominated with kaolinite, montmorillonite, illite or 1.42 nm intergradient minerals, and mineralogy classes for the identification of soil families of clayed soil profiles included kaolinitic mixed, mixed or illitic.

Key words: Stagnic anthosols; Clay mineral; Spatial distribution; Mineralogy classes of soil family; Guangxi

①基金项目: 国家科技基础性工作专项重点项目(2014FY110200)和国家自然科学基金项目(41271233)资助。

*通讯作者(luying@scau.edu.cn)

作者简介: 欧锦琼(1992—), 女, 广西梧州人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤发生与系统分类。 E-mail: 18320722210@163.com

黏粒矿物是土壤重要组分,是影响土壤物理和化学性质的重要因素^[1]。不同黏粒矿物组合显著地影响土壤吸附和保持养分的能力,反映了土壤发生发育过程或强度^[2],也是中国土壤系统分类中土族划分的重要依据^[3-4]。气候和成土母质是影响黏粒矿物组成的重要因素,不同纬度带土壤黏粒矿物组成呈现明显的地带性差异^[5-6];黏粒矿物既可以来源于母质,也可以是风化成土过程的产物,成土母质所含矿物的类型、组成和化学性质的不同,最终可形成不同的黏粒矿物^[7-8];而在土壤垂直带谱中,黏粒矿物组成受到海拔高度影响^[9-11]。

水耕人为土(水稻土)是在长期季节性淹水种稻条件下,受人为活动和自然因素的双重影响,经过水耕熟化过程和土壤周期性氧化还原交替形成的特殊土壤类型^[12],由于其起源土壤类型多种多样^[13],其发生与演变过程对土壤管理有重要意义^[14-15]。水耕人为土的黏粒矿物组成既与母土相关,呈现地带性特征;也深受人为水耕复种、水旱轮作等耕作措施的影响,因此研究水耕人为土的黏粒矿物组成,对探讨其发育和管理都有一定的意义^[13,16]。Li 等^[17]对江西不同植稻年限水耕人为土的研究发现,植稻超过 30 a 会导致含钾较多的黏粒矿物如伊利石的降低。刘永辉等^[18]认为长期施用钾肥和有机肥有利于蛭石向水云母转化。Han 等^[19]发现不同母质的土壤种稻后,伊利石类矿物有所增加,认为这可能与钾肥的持续施用有关。郑庆福等^[20]指出经水田利用后的湿润均富土(黑土),发生了云母→伊利石→蛭石和绿泥石的黏粒矿物的演变过程。徐祥明等^[21]发现西南水耕人为土耕作层和水耕氧化还原层的黏粒矿物主要为蛭石、高岭石、伊利石、混层矿物等,与旱地土壤有明显的不同。

广西地处华南,其水耕人为土面积约 165 万 hm^2 ,是面积最大的耕作土壤,占耕作土壤总面积的 64.2%^[22]。但有关土壤黏粒矿物组成的资料还主要停留于第二次土壤普查成果^[22-23],虽然近年来有了土壤黏粒矿物研究的零星报道^[24],但基本未涉及水耕人为土。水耕氧化还原层(Br)是鉴别水耕人为土的诊断层之一,能深刻反映水耕氧化还原和物质淋溶淀积过程。为此,本文选取了广西不同纬度和成土母质发育的代表性水耕人为土,测定分析了其典型的 Br 层的黏粒矿物组成,旨在进一步增进对广西水耕人为土黏粒矿物组成及其空间分布特征的理解,也可为“黏质土壤(土族控制层段颗粒大小级别为粗骨黏质、黏质或极黏质)”土族的矿物学类型鉴定提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

在广西壮族自治区调查了分布于不同纬度、不同母质上发育的 18 个代表性水耕人为土剖面。野外土壤剖面挖掘、发生层次划分、形态描述和土壤样品采集依据《野外土壤描述与采样规范》^[25]。供试土壤基本信息见表 1,土族矿物学类型由土壤颗粒大小级别和矿物组成共同决定,土族颗粒大小级别的确定依据划分标准^[4]。

1.2 测定项目与分析方法

分层土样测定项目和方法^[27]: pH, 电位法(水土比 2.5: 1); 颗粒组成, 吸管法; CaCO_3 相当物, 气量法; 有机碳, 重铬酸钾外加热容量法; CEC, 乙酸铵交换-凯氏定氮法; 交换性盐基组成, 乙酸铵交换法; K^+ 、 Na^+ -火焰光度法, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} -原子吸收光谱法; 全铁, 氢氟酸-高氯酸-硫酸消解, 比色法; 游离铁, DCB 提取-比色法。各剖面典型 Br 层土壤理化性状见表 2。

黏粒的分离提取与黏粒矿物鉴定^[27]: <2 mm 细土用 H_2O_2 去除有机质, 用 0.5 mol/L 的 NaOH 调节土壤悬液至 pH 为 7 ~ 8, 并经加热煮沸分散处理后, 用沉降法分离 <2 μm 黏粒, 直至悬液中不含 <2 μm 黏粒为止; 土壤黏粒经 DCB 脱铁处理后, 分别制成 Mg-甘油饱和定向片、K 饱和定向片后进行 XRD 分析, K 饱和定向片依次加热至 300 $^\circ\text{C}$ 和 550 $^\circ\text{C}$, 恒温 2 h 后再进行衍射扫描。分析仪器型号为 Rigaku-ultima IV(日本); 测试条件为: $\text{CuK}\alpha$ 辐射, 管压 40 kV, 管流 40 mA, 步进扫描, 速度为 10 $^\circ/\text{min}$, 步长 0.01 $^\circ$, 扫描 2 θ 范围为 3 $^\circ$ ~ 35 $^\circ$ 。

XRD 图谱分析^[9-10]: 通过对比分析不同处理的 XRD 图谱特征峰的变化(表 3)确定黏粒矿物类型, 与此同时, 0.72 nm 和 0.357 nm 均为高岭石衍射峰, K 饱和处理与加热 300 $^\circ\text{C}$ 后峰形没有明显变化, 加热到 550 $^\circ\text{C}$ 时衍射峰消失, 若存在绿泥石, Mg-甘油饱和片和 K 饱和片的衍射图谱上会有 1.42 nm 衍射峰, K 饱和片加热后不消失且 0.354 nm 处有稳定的衍射峰, 此时的 0.72 nm 衍射峰为高岭石和绿泥石重合峰, 计算时需根据镁-甘油饱和定向片的衍射图谱中 0.354 nm 和 0.357 nm 峰的峰面积比值区分高岭石和绿泥石; 与 1.42 nm 过渡矿物相同峰位置和 0.480 nm 处同时出现衍射峰则指示蛭石的存在; 1.0、0.50 和 0.334 nm 均为伊利石衍射峰, 各处理后衍射峰稳定存在; 石英衍射峰为 0.426 nm, 与伊利石的 0.334 nm 峰重合并稳定存在。

表 1 供试土壤基本信息
Table 1 Basic information of studied soil profiles

剖面号	Br 层 (cm)	纬度	经度	年均气温 (°C)	年均降雨量 (mm)	成土母质	土壤类型	土族颗粒大小 级别类型
45-049	25 ~ 45	25°27'33"N	110°23'59"E	18 ~ 19	1 800 ~ 2 000	河流冲积物	筒育水耕人为土	黏壤质
45-085	22 ~ 56	25°14'51"N	107°27'22"E	17 ~ 18	1 400 ~ 1 600	第四纪红土	铁聚水耕人为土	黏质
45-108	25 ~ 60	25°13'42"N	109°29'26"E	19 ~ 20	1 600 ~ 1 800	砂页岩风化物	铁聚水耕人为土	黏质
45-144	30 ~ 53	25°05'54"N	111°14'58"E	18 ~ 19	1 600 ~ 1 800	紫色砂页岩风化物	筒育水耕人为土	黏壤质
45-094	33 ~ 60	24°40'19"N	107°53'11"E	19 ~ 20	1 400 ~ 1 600	宽谷冲积物	潜育水耕人为土	黏质
45-111	23 ~ 42	24°08'43"N	108°58'03"E	20 ~ 21	1 400 ~ 1 600	砂页岩风化物	筒育水耕人为土	黏壤质
45-102	37 ~ 72	24°08'08"N	108°00'59"E	21 ~ 22	1 400 ~ 1 600	石灰岩风化物	潜育水耕人为土	壤质
45-151	17 ~ 40	23°48'48"N	111°32'30"E	20 ~ 21	1 400 ~ 1 600	紫色砂页岩风化物	铁聚水耕人为土	黏质
45-125	27 ~ 42	23°28'40"N	110°31'02"E	21 ~ 22	1 400 ~ 1 600	砂页岩风化物	筒育水耕人为土	黏质
45-117	27 ~ 52	23°13'53"N	109°19'13"E	21 ~ 22	1 400 ~ 1 600	宽谷冲积物	铁聚水耕人为土	黏壤质
45-073	19 ~ 41	23°11'53"N	106°32'23"E	19 ~ 20	1 400 ~ 1 600	第四纪红土	铁聚水耕人为土	黏质
45-157	22 ~ 34	22°59'28"N	110°46'26"E	21 ~ 22	1 400 ~ 1 600	花岗岩风化物	铁聚水耕人为土	黏壤质
45-020	30 ~ 52	22°48'07"N	108°00'15"E	21 ~ 22	1 200 ~ 1 400	第四纪红土	筒育水耕人为土	黏质
45-032	21 ~ 51	22°12'16"N	107°12'30"E	22 ~ 23	1 200 ~ 1 400	第四纪红土	铁渗水耕人为土	黏质
45-135	26 ~ 42	22°09'02"N	110°16'02"E	21 ~ 22	1 600 ~ 1 800	河流冲积物	铁聚水耕人为土	壤质
45-010	23 ~ 46	21°48'26"N	108°28'54"E	22 ~ 23	2 000 ~ 2 200	滨海沉积物	潜育水耕人为土	黏壤质
45-011	28 ~ 58	21°43'42"N	108°04'25"E	22 ~ 23	2 000 ~ 2 200	花岗岩风化物	潜育水耕人为土	壤质
45-001	20 ~ 40	21°38'11"N	108°47'11"E	22 ~ 23	2 000 ~ 2 200	滨海沉积物	筒育水耕人为土	壤质

注：土壤类型划分依据《中国土壤系统分类检索(第三版)》^[26]

表 2 供试土壤 Br 层基本理化性质
Table 2 Basic physicochemical properties of Br horizons in studied soil profiles

剖面号	颗粒组成(g/kg)			pH	CaCO ₃ 相 当物(g/kg)	有机碳 (g/kg)	游离 Fe ₂ O ₃ (g/kg)	CEC(cmol (+)/kg)	交换性盐基 (cmol(+)/kg)
	砂粒 2 ~ 0.05 mm	粉粒 0.05 ~ 0.002 mm	黏粒 < 0.002 mm						
45-049	559	154	287	6.3	-	4.7	29.7	5.5	5.3
45-085	162	412	426	8.0	4.3	4.1	46.5	13.9	-
45-108	104	515	381	5.7	-	9.0	45.4	8.7	7.3
45-144	337	406	257	8.1	10.5	4.8	30.1	12.1	-
45-094	52	492	456	6.6	-	9.6	49.8	12.5	14.2
45-111	126	632	242	7.2	-	3.1	24.1	8.8	13.2
45-102	68	788	144	8.4	347.0	4.2	14.1	4.9	-
45-151	235	289	476	7.1	-	18.2	33.4	13.6	16.5
45-125	221	368	411	6.4	-	8.4	51.5	10.3	6.9
45-117	239	542	219	7.7	3.3	4.4	37.5	10.7	17.4
45-073	137	441	422	8.1	24.4	8.4	58.3	11.6	-
45-157	492	248	260	5.3	-	16.0	23.8	9.4	4.4
45-020	91	367	542	7.0	-	6.3	55.9	13.9	6.3
45-032	135	472	393	7.4	-	3.8	27.0	17.2	20.5
45-135	626	227	147	5.5	-	4.3	8.0	3.3	2.6
45-010	283	395	322	3.6	-	9.4	32.5	11.7	1.0
45-011	539	321	140	5.0	-	2.6	5.8	3.3	1.0
45-001	309	376	315	7.2	-	2.7	26.2	12.3	9.1

表 3 主要层状黏粒矿物 d_{001} XRD 衍射特征(nm)
Table 3 X-ray diffraction characteristics of d_{001} (nm) of main phyllosilicate minerals

处理方法	高岭石	伊利石	蒙脱石	蛭石	绿泥石	1.42 nm 过渡矿物	1.20 nm 混层矿物	三水铝石
Mg-甘油	0.72	1.0	1.8	1.42	1.42	1.42	1.2	0.485
K-25℃	0.72	1.0	1.0~1.2	1.0	1.42	1.42	1.20~1.0 宽峰	0.485
K-300℃	0.72	1.0	1.0~1.2	1.0	1.42	1.4~1.0 宽峰	消失	消失
K-550℃	消失	1.0	1.0	1.0	1.38	1.4~1.0 宽峰	消失	消失

1.3 数据分析

数据的处理和作图使用 MS Excel 2010 和 Origin 9.0。黏粒矿物的定性分析使用 MDI Jade 6.0, 根据 4 种处理条件(Mg-甘油饱和、K 饱和 -25℃、K 饱和 -300℃、K 饱和 -550℃)下获得的 XRD 衍射谱进行叠加对比进行匹配(表 3)。半定量分析采用 XRD 图谱的 Mg 饱和峰面积进行估算: Mg-甘油饱和和片衍射图谱使用 Jade 软件平滑和扣除背景值后, 计算各矿物特征衍射峰面积, 并乘以其比例系数(蒙脱石×1, 蛭石、绿泥石、1.42 nm 过渡矿物和 1.20 nm 混层矿物×2, 伊利石×3.5, 高岭石×2, 三水铝石×1), 然后分别根据各特征峰的面积占总面积的百分数确定各黏粒矿物的相对含量^[10]。

2 结果与讨论

2.1 广西水耕人为土黏粒矿物组成特征

供试 18 个代表性水耕人为土剖面中 Br 层黏

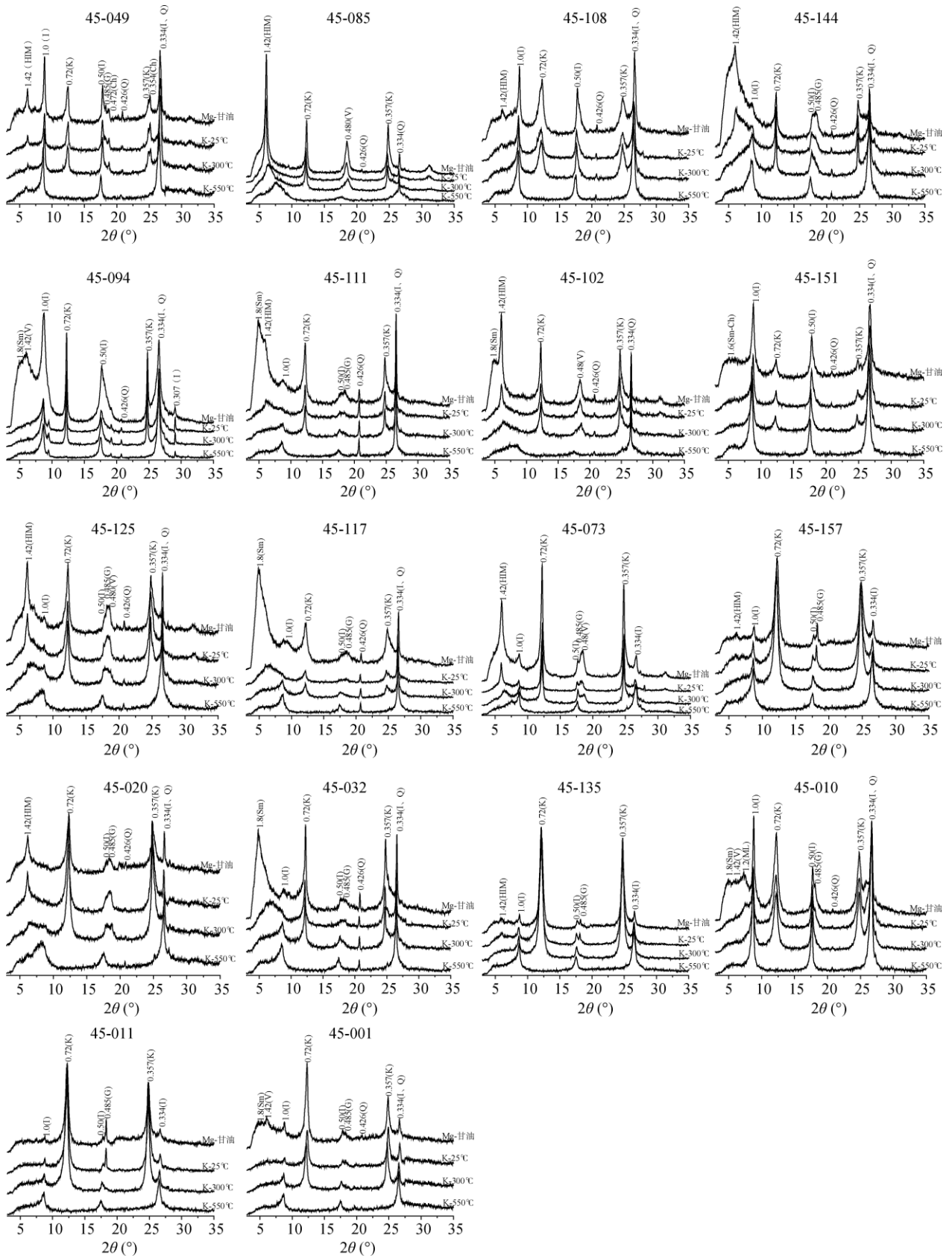
粒矿物 XRD 图谱显示(图 1)表明其黏粒矿物组成种类丰富, 其中 100% 的供试剖面含有高岭石, 分别有 88.9%、72.2%、61.1%、44.4% 和 38.9% 的剖面含有伊利石、三水铝石、1.42 nm 过渡矿物、蒙脱石和蛭石, 个别剖面还有 1.2 nm 混层矿物和绿泥石(表 4)。高岭石、伊利石、三水铝石、1.42 nm 过渡矿物、蒙脱石、蛭石、1.20 nm 混层矿物和绿泥石的相对含量分别介于 11.7%~89.2%(平均 42.2%)、0~84.7%(平均 19.84%)、0~4.2%(平均 1.46%)、0~83.9%(平均 20.08%)、0~77.0%(平均 11.44%)、0%~20.3%(平均 3.84%)、0~1%(平均 0.06%)和 0~13.2%(平均 0.73%)。黏粒矿物相对含量平均值依次为高岭石>1.42 nm 过渡矿物>伊利石>蒙脱石>蛭石>三水铝石>绿泥石>1.20 nm 混层矿物。

2.2 纬度对黏粒矿物组成特征的影响

不同纬度反映了不同的气候, 气候是影响土壤黏粒矿物的主要因素。图 1 反映由北到南的不同纬度区

表 4 黏粒矿物相对含量(%)和“黏质”剖面的土族控制层段矿物学类型
Table 4 Relative contents of clay minerals and mineralogy classes of soil family in clayed soil profiles

剖面号	高岭石	伊利石	三水铝石	1.42 nm 过渡矿物	蒙脱石	蛭石	1.20 nm 混层矿物	绿泥石	“黏质”剖面土族矿物学类型
45-049	11.9	49	0.9	25	-	-	-	13.2	-
45-085	17	-	-	62.7	-	20.3	-	-	混合型
45-108	48.5	46	-	5.5	-	-	-	-	高岭石混合型
45-144	10.7	1	4.4	83.9	-	-	-	-	-
45-094	19.4	66.7	-	-	6.7	7.2	-	-	伊利石型
45-111	23.4	7.4	1.3	38.1	29.9	-	-	-	-
45-102	34	-	-	18.4	27.8	19.8	-	-	-
45-151	11.7	84.7	-	-	3.6	-	-	-	伊利石型
45-125	46	8.7	4.3	32.8	-	8.2	-	-	高岭石混合型
45-117	19	2	2	-	77	-	-	-	-
45-073	31.9	-	3.7	51.4	-	6.7	-	-	高岭石混合型
45-157	87.4	9.6	1.5	1.4	-	-	-	-	-
45-020	52.3	8.5	0.3	38.8	-	-	-	-	高岭石型
45-032	32	6.6	1.7	-	59.7	-	-	-	高岭石混合型
45-135	83.3	12.6	0.7	3.4	-	-	-	-	-
45-010	57.5	40.2	0.5	-	0.3	0.5	1	-	-
45-011	89.2	6.5	4.2	-	-	-	-	-	-
45-001	84.2	7.6	0.8	-	0.9	6.5	-	-	-



(Sm: 蒙脱石; HIM: 1.42 nm 过渡矿物; ML: 1.20 nm 混层矿物; I: 伊利石; K: 高岭石; G: 三水铝石; V: 蛭石; Ch: 绿泥石; Mg: 甘油表示镁: 甘油饱和和处理, K: 25°C表示常温下钾饱和和处理, K: 300°C、K: 550°C分别为钾饱和和加热 300°C 和 550°C 的处理)

图 1 广西水耕人为土 Br 层黏粒矿物的 XRD 图谱
 Fig. 1 XRD patterns of clay minerals in Br horizons of Stagnic anthosols in Guangxi

域水耕人为土黏粒矿物的 X 衍射图谱。图 1 表明, 由北到南随着纬度的降低, 伊利石的 1.0 nm 衍射峰渐弱或峰形渐萎缩, 伊利石晶层受破坏程度越大, 伊利石相对含量呈减少趋势。伊利石通常由多钾原生矿物在弱碱弱淋溶作用下形成, 是弱风化程度矿物, 水耕和强风化条件下, 伊利石出现蚀变甚至退变^[21, 28]。随纬度降低, 温度逐渐升高, 降雨量逐渐增大(表 1), 土壤的淋溶风化加强, 脱钾作用强烈, 其层间钾淋失, 水分子和其他离子嵌入或置换, 导致伊利石层间距加大, 逐渐演化成为蒙脱石、蛭石和 1.42 nm 过渡矿物^[7, 20]。若在碱性条件下, 伊利石吸收 Mg^{2+} 则演化成蒙脱石, 蒙脱石的存在可能同时与土壤偏钙质^[6]、钙镁盐基硅酸盐黏粒等大量积聚有关或由斜长石等原生矿物在弱碱性条件下转化而来^[29]: 例如 45-102 剖面 $CaCO_3$ 相当物丰富, 45-032、45-111 和 45-117 剖面盐基离子丰富(表 2), 因此有较多蒙脱石。若伊利石层间 K^+ 被二价的水合阳离子置换, 相邻晶层结合力减弱, 晶层间距膨胀则形成蛭石, 蛭石是中等风化强度的产物。若在有机碳含量低且干湿交替的环境下, 蛭石或者蒙脱石等膨胀性黏粒矿物中羟基化的铝离子在层间发生聚合, 形成过渡型 1.42 nm 矿物^[5], 水耕人为土黏粒矿物受人水耕复种等耕作措施影响, 多有不同程度的过渡型矿物形成^[20-21]。2:1 型黏粒矿物(如伊利石和蒙脱石)是巨大的、可再生的钾储存库^[30-31], 纬度降低, 则气候逐渐高湿炎热, 化学风化加强, 碱金属(主要是 K^+) 被带走, 伊利石或蒙脱石在微酸性条件下将进一步分解为高岭石^[32]。由图 1 可见, 北部区域的水耕人为土黏粒中高岭石衍射峰相对较弱且较宽, 个别在一定程度上有向低角度拖尾现象, 说明其黏粒中的高岭石较少且结晶较弱; 南部区域黏粒中高岭石的峰窄集中, 说明高岭石丰富且结晶好, 高岭石呈现随纬度降低而增加的趋势(表 4)。高岭石是高度风化的标志矿物, 形成于高温多雨的气候条件下^[28], 低纬度地区的较高温度和丰富降雨量使土壤风化淋溶作用强烈, 高岭石大量存在。随纬度降低, 矿物风化加深, 出现三水铝石, 可能是高温多雨、酸性淋溶下由原生矿物迅速脱硅, 直接风化形成^[9]。

因此, 随纬度降低, 高岭石呈增加趋势, 伊利石、蒙脱石和 1.42 nm 过渡矿物相对含量呈减少趋势, 但蛭石、三水铝石和绿泥石与纬度之间没有呈现明显的变化规律。与半定量结果结合分析表明, 随着风化和淋溶程度的发展, 黏粒矿物的演变可能顺着伊利石 \rightarrow 1.42 nm 过渡矿物和蒙脱石 \rightarrow 高岭石的方向演变。

主要的黏粒矿物组成和相对含量具有明显的地带性差异, 这种在纬度空间分布上具有明显规律性差异的特征与已有的研究结果是一致的^[6, 33]。

2.3 成土母质对黏粒矿物组成的影响

由 XRD 图谱(图 1)可以看出, 滨海沉积物母质水耕人为土(45-001、45-010 剖面)黏粒矿物以高岭石为主, 另外含有伊利石、蛭石和蒙脱石等。花岗岩母质发育的水耕人为土(45-011 和 45-157 剖面)黏粒中矿物主要为高岭石、伊利石和少量三水铝石和 1.42 nm 过渡矿物。第四纪红土母质水耕人为土(45-020、45-032、45-073 和 45-085 剖面)黏粒中有高岭石、1.42 nm 过渡矿物、蒙脱石、伊利石或蛭石, 伊利石峰形均较萎缩, 可能与强烈淋溶使层间脱钾^[20]或人为水耕影响有关; 45-032 剖面黏粒中有蒙脱石, 蒙脱石在湿热条件下微酸性介质中容易转化形成高岭石, 衍射峰显得较宽。由于花岗岩和第四纪红土发育程度高, 风化作用较强, 高岭石大多高于相同环境下其他母质发育的水耕人为土, 或是大部分来自母质的云母和钾长石等原生矿物由脱钾和脱硅作用演变而成^[13]。

石灰岩母质水耕人为土(45-102 剖面)黏粒矿物为高岭石、蒙脱石、蛭石和 1.2 nm 过渡矿物; 砂页岩母质水耕人为土(45-125、45-108、45-111 剖面)黏粒以高岭石或 1.42 nm 过渡矿物为主, 其次为蒙脱石和伊利石。与花岗岩和第四纪红土相比, 石灰岩、砂页岩母质的矿物高岭石减少, 而伊利石和过渡矿物明显增多, 这可能和母质本身发育程度较弱有关, 也有可能是这些母质发育的水耕人为土处于纬度较高的地区, 风化淋溶强度较弱所致; 紫色砂页岩母质水耕人为土(45-144、45-151 剖面)黏粒以伊利石或 1.42 nm 过渡矿物为主, 其原因在于紫色砂页岩含钾丰富, 长期种稻脱钾明显但主要集中在原生矿物部分, 可能促进伊利石类似矿物的形成^[19]。

冲积物(45-135、45-049、45-094、45-117 剖面)母质的水耕人为土黏粒矿物组成与所处纬度相关, 高纬度主要是伊利石, 低纬度为高岭石或蒙脱石, 不同纬度区域差异明显, 符合起源土壤所反映的生物气候地理分布规律^[33], 另外, 冲积物发育形成的土壤所含黏粒矿物与上游物质来源有关^[13]。

同一区域不同母质发育的水耕人为土中黏粒矿物类型均较多, 总体来说, 广西北部区域, 黏粒中伊利石和 1.42 nm 过渡矿物多于南部, 而高岭石少于南部, 且较少出现三水铝石; 越往南, 随着伊利石的层间脱钾逐步演化过渡最终形成高岭石, 在南部区域, 黏粒矿物均以高岭石为主, 并出现少量三水铝石。此

外,广西种稻历史悠久,人为活动在一定程度上影响了黏粒矿物的演化,这削弱了不同母质水耕人为土黏粒矿物组成的差异。

2.4 黏粒矿物组成在“黏质”土壤土族划分中的应用

根据中国土壤系统分类土族划分依据^[4]，“黏质”（包括粗骨黏质、黏质、极黏质 3 类）的土族矿物学类型由黏粒矿物特征决定。在本研究供试剖面中，45-085、45-108、45-094、45-151、45-125、45-073、45-020、45-032 等 8 个剖面颗粒大小级别为“黏质”，其土族控制层段的矿物学类型分别可以用黏粒矿物组成来确定(表 4)，比较不同纬度区域剖面可以发现，纬度 23°N 是一明显的分界线，在纬度 < 23°N 区域内，“黏质”水耕人为土黏粒矿物均以高岭石为主，矿物学类型基本为高岭石型，个别为高岭石混合型。而在纬度 > 23°N 区域内，“黏质”水耕人为土黏粒矿物组成与成土母质相关，较为复杂，主要黏粒矿物包括蒙脱石、伊利石、1.42 nm 过渡矿物和高岭石等，由此导致土族控制层段矿物学类型复杂多样，包括高岭石混合型、混合型 and 伊利石型。第四纪红土母质的为高岭石型、高岭石混合型或混合型，冲积物母质的为伊利石型，砂页岩母质的为高岭石混合型，紫色砂页岩母质的为伊利石型。

需要说明的是：①在本研究供试剖面中，有 10 个剖面颗粒大小级别属于非黏质(表 2)，其土族控制层段的矿物学类型则需要分析 0.02 ~ 2 mm 颗粒的原生矿物组成或 < 2 mm 细土的矿物组成来划分，这部分内容将另外介绍，但其黏粒矿物组成仍可应用于同一区域同种类型“黏质”土壤土族矿物学类型的检索。②由于广西水耕人为土黏粒矿物组成复杂，矿物学类型多样，本研究中供试样品数量有限，初步得到的结论可能存在局限性，今后需要通过进一步扩大样品的空间分布和数量开展研究，才能更好地服务于中国土壤系统分类中土族的划分。

3 结论

1) 广西水耕人为土 Br 层黏粒矿物组成种类丰富，包括高岭石、伊利石、三水铝石、1.42 nm 过渡矿物、蒙脱石、蛭石，供试剖面中含高岭石的占 100%，含伊利石占 88.9%，分别有 72.2%、61.1%、44.4%、38.9% 的剖面含有三水铝石、1.42 nm 过渡矿物、蒙脱石、蛭石。

2) Br 层黏粒矿物组成在纬度空间分布上具有明显规律性特征。随着纬度降低，高岭石增加，伊利石、

蒙脱石和 1.42 nm 过渡矿物逐渐减少；在纬度 > 23°N 区域，成土母质对黏粒矿物组成影响明显。

3) 纬度 23°N 是黏粒矿物组成和“黏质”土壤的土族矿物学类型分界线，在纬度 < 23°N 区域内，黏粒矿物以高岭石为主，矿物学类型基本为高岭石型。在纬度 > 23°N 区域内，主要黏粒矿物包括蒙脱石、伊利石、1.42 nm 过渡矿物和高岭石，土族矿物学类型复杂多样，包括高岭石混合型、混合型和伊利石型。

参考文献：

- [1] Wilson M J. The origin and formation of clay minerals in soils: Past, present and future perspectives[J]. *Clay Minerals* 1999, 34: 7–25.
- [2] Velde B, Meunier A. The origin of clay minerals in soils and weathered rocks[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [3] 龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 等. 土壤发生与系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] 张甘霖, 王秋兵, 张凤荣, 等. 中国土壤系统分类土族和土系划分标准[J]. *土壤学报*, 2013, 50(4): 826–834.
- [5] 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): 51–58.
- [6] 郑庆福, 刘艇, 赵兰坡, 等. 东北黑土耕层土壤黏粒矿物组成的区域差异及其演化[J]. *土壤学报*, 2010, 47(4): 734–746.
- [7] 刘杭, 王蒙, 张志丹, 等. 不同母质黑钙土黏粒矿物组成研究[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 255–260, 266.
- [8] Navarrete I A, Tsutsuki K, Asio V B, et al. Chemical, mineralogical, and morphological characteristics of a late quaternary sedimentary rock-derived soils in Leyte, Philippines[J]. *Soil Science*, 2011: 1.
- [9] 张治伟, 许娟娟, 严焕德, 等. 海拔与岩性变异对石灰岩发育土壤黏土矿物组成的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 535–542.
- [10] 刘智杰, 董雪, 张志毅, 等. 九宫山土壤剖面中黏土矿物的组成特征[J]. *土壤*, 2017, 49(4): 795–802.
- [11] Mavris C, Plätze M, Mirabella A, et al. Clay mineral evolution along a soil chronosequence in an Alpine proglacial area[J]. *Geoderma*, 2011, 165(1): 106–117.
- [12] 龚子同, 陈志诚, 史学正, 等. 中国土壤系统分类: 理论·方法·实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [13] 李庆远. 中国水稻土[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [14] Liu Y L, Zhang B, Li C L, et al. Long-term fertilization influences on clay mineral composition and ammonium adsorption in a rice paddy soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(6): 1580–1590.
- [15] Chen L M, Zhang G L, Effland W R. Soil characteristic response times and pedogenic thresholds during the 1000-year evolution of a paddy soil chronosequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(5): 1807–1820.

- [16] 程月琴, 杨林章, 曹志洪. 绰墩遗址古今水稻土黏土矿物特征比较研究[J]. 土壤, 2011, 43(4): 617-622.
- [17] Li Z P, Velde B, Li D C. Loss of k-bearing clay minerals in flood-irrigated, rice-growing soils in Jiangxi Province, China[J]. Clays and Clay Minerals, 2003, 51(1): 75-82.
- [18] 刘永辉, 张静妮, 崔德杰, 等. 长期定位施肥对非石灰性潮土黏粒矿物组成及主要理化性质的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(4): 697-702.
- [19] Han G Z, Zhang G L, Li D C, et al. Pedogenetic evolution of clay minerals and agricultural implications in three paddy soil chronosequences of South China derived from different parent materials[J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(2): 423-435.
- [20] 郑庆福, 赵兰坡, 冯君, 等. 利用方式对东北黑土粘土矿物组成的影响[J]. 矿物学报, 2011, 31(1): 139-145.
- [21] 徐祥明, 覃灵华, 杨慧. 西南典型水耕人为土诊断层黏土矿物特征[J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 265-271.
- [22] 广西土壤肥料工作站. 广西土种志[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1993.
- [23] 广西土壤肥料工作站, 广西土壤[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1994.
- [24] 付旋旋. 广西猫儿山土壤发生特性及系统分类[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [25] 张甘霖, 李德成. 野外土壤描述与采样规范[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [26] 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.
- [27] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [28] 申聪颖, 赵兰坡, 刘杭, 等. 不同母质发育的东北黑土的粘粒矿物组成研究[J]. 矿物学报, 2013, 33(3): 382-388.
- [29] Egashira K, Fujii K, Yamasaki S, et al. Rare earth element and clay minerals of paddy soils from the central region of the Mekong River, Laos[J]. Geoderma, 1997, 78(3/4): 237-249.
- [30] Barre P, Velde B, Catel N, et al. Soil-plant potassium transfer: impact of plant activity on clay minerals as seen from X-ray diffraction[J]. Plant and Soil, 2007, 292: 137-146.
- [31] Rezapour S, Samadi A. The spatial distribution of potassium status and clay mineralogy in relation to different land-use types in a calcareous Mediterranean environment[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(3): 1037-1047.
- [32] 吴敏. 海南岛周边海域环境变化的粘土矿物学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
- [33] 张效年. 中国水稻土的粘土矿物[J]. 土壤学报, 1961(Z2): 81-102.