

X射线衍射法在土壤粘粒矿物测定方面的研究进展

徐蕾^{1,3}, 袁会敏^{1,3*}, 江荣凤^{1,3}, 王雁峰², 武良², 王盛锋²

1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193
2. 农业部作物专用肥料重点实验室, 北京 100193
3. 植物—土壤相互作用教育部重点实验室, 北京 100193

摘要 土壤是由大小不同、形状各异的颗粒组成, 其中土壤粘粒矿物是土壤的重要组成部分之一, 它不仅蕴含着土壤的形成轨迹、发生学特征以及成土环境的变化, 而且还能够对土壤中的营养物质以及水分起到保蓄的作用。同时, 由于不同类型土壤的粘粒矿物组成不尽相同, 不同利用方式以及长期定位施肥都会对土壤粘粒矿物的演变产生影响, 因此研究土壤粘粒矿物的组成及演变规律, 可以更加全面的了解不同类型土壤之间发生学规律, 对探究土壤肥力的可持续性具有重要意义。目前对土壤粘粒矿物展开研究已经成为农业绿色发展研究的重点之一, X射线衍射分析法(XRD)作为研究土壤粘粒矿物最有效的手段, 具有方便、快捷、测量精度高以及对样品无污染等优点, 近年来受到国内外学者的广泛关注。文章介绍了X射线衍射分析法测定土壤粘粒矿物的基本原理和分析方法, 综述了该技术在测定土壤粘粒矿物方面的国内外研究进展, 并对X射线衍射分析法测定粘粒矿物的应用前景进行了展望。应用XRD对土壤粘粒矿物进行研究, 结合传统分析方法对土壤基本性质进行测定, 可以揭示不同类型土壤的粘粒矿物组成及差异, 以及不同利用方式下的土壤粘粒矿物的组成和演变规律, 从而为土壤肥力的可持续利用及农业绿色发展提供理论基础和技术支撑。目前有关土壤粘粒矿物演变展开的研究多集中于长期定位施肥处理上, 而对于长期秸秆还田以及不同耕作方式引起的土壤粘粒矿物演变的研究却非常少, 相信未来, XRD可以被应用到土壤研究的更多方面, 为农业绿色发展做出贡献。

关键词 X射线衍射仪; 粘粒矿物; 土壤类型; 利用方式

中图分类号: O657.39 **文献标识码:** R **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)04-1227-05

引言

土壤粘粒矿物是土壤的重要组成部分^[1], 一般由层状硅铝酸盐组成, 具有较高的活性, 能够对土壤中的营养物质以及水分起到保蓄的作用^[2], 同时在植物的生长和发育期间提供充足的养分, 是植物与土壤界面反应的基质^[3]。粘粒矿物的形成过程易受环境条件的影响, 外界环境条件如温度、降雨量、地形等的变化都会对粘粒矿物的形成、演变产生影响, 从而改变土壤的肥力水平^[4-6]。因此, 研究土壤粘粒矿物的演变规律, 有利于揭示土壤的形成轨迹、发生学特征以及成土环境, 反应土壤的风化程度, 掌握土壤的肥力水平^[7], 对探究土壤肥力的可持续性具有重要意义。目前, 对土壤粘粒矿物的鉴定应用最广泛的是X射线衍射法(X-Ray diffraction, XRD)。

利用XRD法进行粘土矿物的定性分析是将粘土矿物样品应用X射线扫描得到衍射图谱, 观测其中的衍射峰强度、衍射峰型以及d值等, 并与标准的粘土矿物类型的衍射特征进行比较, 如果与某种标准粘土矿物的衍射特征相符, 那么就可对粘土矿物样品的种属进行定性^[8-9]。

基于土壤粘粒矿物具有不同的晶体构造, 应用XRD方法进行分析测定, 具有不损伤样品、无污染、快捷、测量剪度高、能得到有关晶体完整性的大量信息等优点, 近年来得到了广泛的应用^[10-11]。

1 X射线衍射仪的基本原理

1.1 X射线衍射的物理模型

当X射线照射到待测物体表面时, 物质原子的电子壳层

收稿日期: 2019-04-03, 修订日期: 2019-08-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200403)资助

作者简介: 徐蕾, 女, 1996年生, 中国农业大学资源与环境学院硕士研究生 e-mail: 1277350149@qq.com

* 通讯联系人 e-mail: hmyuan@cau.edu.cn

同 X 射线光子发生弹性碰撞, 向空间发射次生 X 射线球形波; 当次生 X 射线与原射线同波长时, 即形成所谓布拉格散射^[12]。由于每一层原子的电子云都可以产生球形的布拉格散射, 各散射的 X 射线之间可以相互干涉, 导致某些散射方向上的球面波相互增强, 某些方向上相互抵消, 从而出现衍射现象^[13]。

1.2 X 射线衍射仪的工作原理

将待测样品放置在置物台上, 当仪器开始工作时, 左侧的 X 射线光管发出 X 射线照射在样品表面, 右侧的探测器接收到物体反射回来的衍射波后传输回计算机, 最终形成衍射光谱。图 1 为 X 射线衍射仪的工作原理示意图。

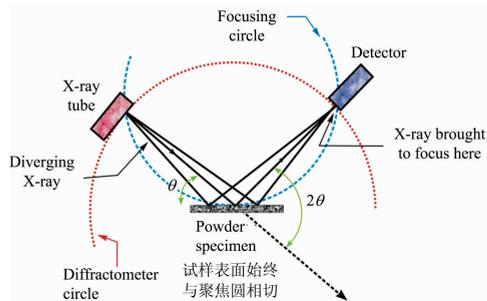


图 1 X 射线衍射仪的工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working principle of X-ray diffractometer

2 X 射线衍射仪测定土壤粘粒矿物的操作流程

2.1 分离粘土矿物

将自然风干、研磨、过 200 目筛后的土壤样品用超声波处理机进行分散处理(150 W, 3 min), 将处理后的土壤根据斯托克斯沉降原理所确定的沉降时间来提取小于 $2 \mu\text{m}$ 粘粒, 直至悬液中不再含有小于 $2 \mu\text{m}$ 粘粒为止。若想提取其他粒级则继续用沉降法和筛分法提取^[14]。

2.2 DCB 法(连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠法)脱铁处理

取分离后的小于 $2 \mu\text{m}$ 的粘粒土壤 1 g 放入 100 mL 离心管中, 并加入 40 mL $0.3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 柠檬酸钠和 5 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠, 水浴加热至 $80 \text{ }^\circ\text{C}$, 再加入 1 g 连二亚硫酸钠固体, 恒温搅拌 30 min, 冷却后用离心机分离, 去除上层液。重复 3 次, 最后用蒸馏水清洗沉积物 3 次^[15]。

2.3 镁-甘油饱和定向片(Mg-Gly)的制备

取经 DCB 法脱铁处理后的土样 1 g 放入 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氯化镁溶液中, 加入 5% 甘油溶液, 用玻璃棒充分搅拌使其散开, 吸取 1.5 mL 悬液, 在洁净的样品盘上均匀铺开, 静置晾干, 制成 Mg-Gly 饱和定向片。

2.4 钾-温度饱和定向片(K-25, K-110, K-250, K-550)

取经 DCB 法脱铁处理后的土样 1 g 放入 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氯化钾溶液中, 用玻璃棒充分搅拌使其散开, 吸取 1.5 mL 悬液, 在洁净的样品盘上均匀铺开, 静置晾干, 制成钾饱和定向片。

将做好的钾饱和定向片放入马沸炉中缓慢加热至 $110 \text{ }^\circ\text{C}$, 恒温 2 h, 冷却后取出, 即为 K-110 饱和定向片(K-250, K-550 处理同上)^[16-17]。

2.5 进行 XRD 扫描

将制作好的上述定向片放入 XRD 仪器的样片架上, 关闭舱门, 进行参数设定, 常用参数设置为: Cu-K α 辐射, 40 kV 40 mA; 扫描角度 2θ 为 $3^\circ \sim 30^\circ$; 步长 step 为 0.01° ; 扫描速度: $10^\circ \cdot \text{min}^{-1}$ 。参数设置完毕后, 即可开始扫描。等待扫描完成后, 进行图谱分析。

2.6 谱图对比分析

将扫描完成以后得到的 XRD 图谱应用 DIFFRAC.EVA 软件或 TOPAS 软件进行元素筛选、数据库对比等步骤, 最终得到每种土壤样品中粘土矿物的类型。

3 X 射线衍射分析法测定土壤粘粒矿物的国内外研究进展

3.1 应用 XRD 对不同类型土壤粘土矿物的研究

XRD 作为表征和探究粘土矿物的类型及演变规律的一种成熟手段, 最基础及广泛的应用是对区域内不同类型的土壤粘土矿物进行定性分析, 探究不同类型土壤在晶体学方面的差异, 以及分析它们之间的演变规律。有学者研究表明黑土和黑钙土中的粘粒矿物均以 2:1 型为主, 主要是蒙脱石和伊利石, 白浆土则以蛭石和伊利石为主, 且含有少量的高岭石、蛭石、绿泥石、石英等原生矿物^[18]。隗英华等应用 XRD 结合傅里叶变换红外光谱法以及扫描电镜对东北四种典型土壤进行了晶体学表征, 结果显示四种土壤以石英为主要矿物成分, 除此之外, 黑土和白浆土还有蒙脱石和高山石等矿物, 棕壤和褐土还有高山石和云母等矿物^[19]。张志丹的研究中黑土取自吉林省四平市, 而隗英华的研究中黑土取自黑龙江省海伦市, 两个研究中采样点不一致可能是两个研究结果不相同的原因。同时 XRD 还可用来探究粘粒矿物之间的演变规律, 有研究表明红土母质上发育的东北黑土风化脱硅作用较强, 在成土过程中, 蒙脱石逐渐向蛭石演变; 黄土母质上发育的东北黑土矿物类型分布相对均匀, 演变规律相对简单^[20]。在对中国中部地区粘土层各粒级土壤粘粒矿物的研究中, 发现随着土壤颗粒粒径的减小, 高岭石和蛭石的数量不断减少, 伊利石的数量不断增加^[21]。Han 等应用 XRD 对发生于不同母质的三种华南水稻土年代序列粘土矿物进行对比分析, 结果表明含钾矿物含量较低的土壤, 粘土矿物类型变化不大; 而含钾矿物丰富的土壤, 脱钾作用较强, 粘土矿物的演变现象比较显著^[22]。还有学者对甘肃省的 15 个地点的灰钙土、栗钙土、黄绵土等不同类型的土壤剖面的粘土矿物进行了分析, 结果表明干旱地区的土壤中原生矿物以石英为主要成分, 次生矿物中含有较多的石膏和方解石等, 粘粒矿物中主要以伊利石、蒙脱石、高岭石、绿泥石为主^[23]。在对湖北省九宫山的四种垂直地带性土壤及其不同粒级土壤颗粒的矿物组成展开研究的过程中, 发现随海拔降低, 土壤中针铁矿、赤铁矿和高岭石的含量不断增加, 伊利石、 1.42 nm 矿物和三水铝石的含量不断下降; 随粒径增大,

1.42 nm 矿物、高岭石和伊利石的含量不断增加,而针铁矿和赤铁矿的含量不断下降^[24]。

3.2 应用 XRD 对不同利用方式下的土壤粘土矿物的研究

有研究表明,长期施肥、耕作、秸秆还田等不同农业措施可以引起土壤粘粒矿物种类和数量的变化^[25]。因此,可以应用 XRD 对不同利用方式下(如长期定位施肥处理、水旱交替利用等)的土壤粘土矿物进行表征,探究不同利用方式下土壤颗粒中粘土矿物的变化特点,并不断揭示粘土矿物可以释放营养元素如钾素等并被作物生长发育所吸收利用的现象。在应用 XRD 法结合化学分析对江汉平原四湖地区不同利用方式下(园果、旱地、水旱轮作、水田)的土壤的粘土矿物进行研究的过程中,发现各土地利用方式下耕层土壤的粘土矿物均以 2:1 型矿物为主,约占粘土矿物的 70%~80%^[26]。在对荒地、林地、耕地这三种不同利用方式下的土壤粘土矿物进行的研究中,发现不同利用方式主要通过影响土壤 pH、交换性酸、有机质等性质进而影响粘土矿物数量的变化,耕地、荒地、林地利用下的土壤矿物风化程度依次降低,绿泥石的含量逐渐升高;耕地中粘土矿物主要以伊利石为主,林地中粘土矿物则以 I/S(伊利石/蒙皂石)混层矿物数量最多^[4]。在对比水田与旱田土壤粘粒矿物的组成特征及演变规律时发现,旱田下的盐碱土粘粒矿物演变过程主要为由 I/S 混层矿物演变为蛭石,水田中演变过程则主要为由黑云母演变为伊利石和由 I/S 混层矿物演变为蛭石并逐渐演变为高岭石。除此以外,XRD 还可以用于探究长期不同施肥处理下的土壤粘粒矿物的组成和演变特征。有研究报道不同施肥处理下土壤粘粒矿物的类型大致相同,且随颗粒粒径增加矿物从 1:1 型向 2:1 型过渡;与荒地土壤相比,氮磷钾处理的土壤中伊利石和蛭石含量减少,HIV 含量增加,而氮磷钾秸秆处理的土壤中伊利石含量减少,蛭石和 HIV 含量增加^[27]。

目前,有越来越多的学者将 XRD 法与传统分析方法相结合,对长期定位施肥条件下的土壤展开研究,发现土壤中钾素含量的变化能够引起土壤中粘土矿物的类型发生演变。比如在长期单施氮肥的情况下,土壤中钾素含量下降,从而导致土壤中伊利石向蛭石转化;而与有机肥配施后,土壤中钾素含量升高,从而导致伊利石的形成^[28]。而连续 83 年不

施肥的耕层土壤中的蒙脱石含量增加^[29]。在对连续定位施肥 26 年的土壤研究中发现,不施钾肥和有机肥处理有利于水云母向蛭石的演变,而施钾肥和有机肥处理有利于蛭石向水云母的演变^[30]。Pierre Barré 等也在研究中发现,在土壤钾收支条件下,钾肥处理与 2:1 型土壤粘粒矿物及土壤粘粒钾含量显著相关^[31]。还有一些研究表明,在不种植作物的荒地土壤上,连续施用钾肥会引起非膨胀性矿物数量的增加^[32]。有学者专门针对钾素盈余与亏缺条件下的土壤粘土矿物的演变规律进行探究,发现长期钾素亏缺导致土壤云母、钾长石等原生矿物加速风化,使伊利石发生明显崩解,可能完全转化为蛭石,并伴随着蒙脱石的形成^[33]。因此,土壤中 2:1 型粘土矿物是一个巨大的、可再生的钾库,而且不同的耕作条件会影响土壤中粘土矿物的演变^[34]。

4 展 望

XRD 物相分析方法是一种简单便捷、可重现性高,并能在不损伤样品的同时,对土壤粘土矿物进行定性分析,探究矿物的组成情况和演变规律的方法手段,被广泛应用于各个不同的研究领域^[35-36]。XRD 物相分析方法与传统土壤性质测定方法相结合,可以在较短时间内对土壤样品进行分析,了解其物理化学性质,为农业生产及测土配方施肥提供强有力的技术支持。

目前,有研究表明连续施用钾肥配合秸秆还田不仅能够提高土壤中有机质和团聚体的数量,改善土壤结构,提高土壤的稳定性^[37],同时能够对耕层土壤中的速效钾和缓效钾含量起到显著提高的作用^[38]。同时,有研究表明长期钾素盈余或亏缺会造成土壤中的粘土矿物发生演变^[35]。那么长期秸秆还田以及不同耕作方式是否会引起耕层土壤中粘土矿物类型的演变呢?研究长期秸秆还田等措施下的耕层土壤中粘粒矿物的演变,对合理利用秸秆以及农田土壤的开发、保护和可持续利用具有重要意义。然而针对这一问题展开的研究目前还非常少,相信未来 XRD 法还可以在这一研究方向甚至更广泛的研究中发挥作用,从而在全面了解土壤物理化学性质的研究也能发挥更大的作用。

References

- [1] LI Hou-wen, SUN Hong(李后文,孙宏). XiongYi Wen Ji(熊毅文集). Beijing: Science Press(北京:科学出版社), 2003.
- [2] Velde B B. The Origin of Clay Minerals in Soils and Weathered Rocks. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [3] SHEN Shan-min(沈善敏). Soil Fertility in China(中国土壤肥力). Beijing: China Agriculture Press(北京:中国农业出版社), 1998.
- [4] YUAN Ning, WANG Ji-hong, et al(袁宁,王继红,等). Journal of Jilin Agricultural University(吉林农业大学学报), 2019, (1): 55.
- [5] LU Peng, ZHOU Chao, CHEN Sheng-bo, et al(路鹏,周超,陈圣波,等). Journal of China University of Geosciences(中国地质大学学报), 2015, 40(8): 1386.
- [6] Zhang Z Y, Huang L, Liu F, et al. Applied Clay Science, 2016, 120: 51.
- [7] LI Xiao-hu, ZHANG Xin-hu, ZHENG Peng, et al(李小虎,张新虎,郑朋,等). Gansu Geological Journal(甘肃地质学报), 2003, (1): 37.
- [8] WANG Qian, FANG Hong-shu(王倩,方宏树). Modern Chemical Research(当代化工研究), 2016, (7): 146.
- [9] ZHANG Rong-ke, FAN Guang(张荣科,范光). Uranium Geology(铀矿地质), 2003, (3): 180.
- [10] XIE Ping-ruo(谢萍若). ZHONGGUO DONGBEI TURANG HUAXUE KUANGWUXUE XINGZHI(中国东北土壤化学矿物学性质).

- Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2010.
- [11] PU Hai-bo(蒲海波). Site Investigation Science and Technology(勘察科学技术), 2011, (5): 12.
- [12] Patterson A L. Journal of the American Chemical Society, 1955, 77(7): 2030.
- [13] ZHENG An-na, CHEN Jian-ding, WU Xu-qin(郑安呐, 陈建定, 吴叙勤). Chinese Journal of Nature(自然杂志), 1991, (7): 512.
- [14] National Agricultural Technology Extension and Service Center(全国农业技术推广服务中心). Technical Specification for Soil Analysis(土壤分析技术规范). Beijing: China Agriculture Press(北京: 中国农业出版社), 2006.
- [15] LI Rong-biao, HONG Han-lie, YIN Ke, et al(李荣彪, 洪汉烈, 殷科, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2013, 33(4): 1122.
- [16] Gribble C D. Rutleys Elements of Mineralogy. 27th ed. London: Academic Division of Unwin Hyman, 1998. 27.
- [17] Schellmann W. Considerations on the Definition and Classification of Laterites. Trivandrum: Oxford & IBH Publishing Co, 1981. 1.
- [18] ZHANG Zhi-dan, LUO Xiang-li, WANG Ji-hong, et al(张志丹, 罗香丽, 王继红, 等). Acta Mineralogica Sinica(矿物学报), 2016, 36(1): 97.
- [19] JUAN Ying-hua, WU Zhi-jie, CHEN Li-jun, et al(隽英华, 武志杰, 陈利军, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2010, 30(7): 1918.
- [20] SHEN Cong-ying, ZHAO Lan-po, LIU Hang, et al(申聪颖, 赵兰坡, 刘杭, 等). Acta Mineralogica Sinica(矿物学报), 2013, 33(3): 382.
- [21] Ndzana G M, Huang L, Wang J B, et al. Applied Clay Science, 2018, 151: 148.
- [22] Han G Z, Zhang G L, Li D C, et al. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(2): 423.
- [23] ZHANG Ming-jie, ZHANG Yu, LI Xiao-hu, et al(张铭杰, 张昱, 李小虎, 等). Journal of Lanzhou University(兰州大学学报), 2007, (3): 1.
- [24] LIU Zhi-jie, DONG Xue, LIU Fan, et al(刘智杰, 董雪, 刘凡, 等). Acta Mineralogica Sinica(矿物学报), 2018, 38(2): 166.
- [25] Liao Y L, Zheng S X, Nie J, et al. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(4): 694.
- [26] XU Jin-ling, ZHU Zhi-feng, HUANG Chuan-qin, et al(徐晋玲, 朱志锋, 黄传琴, 等). Acta Mineralogica Sinica(矿物学报), 2014, 34(1): 47.
- [27] LIU Zhi-jie, HUANG Li, LI Feng, et al(刘智杰, 黄丽, 李峰, 等). Acta Mineralogica Sinica(矿物学报), 2018, 38(5): 563.
- [28] LIN Shao-wen, CHEN Yan-ling, LIU Shu-tang, et al(林少雯, 陈延玲, 刘树堂, 等). Acta Agriculturae Boreali-Sinica(华北农学报), 2017, 32(4): 142.
- [29] Velde B, Peck T. Clays & Clay Minerals, 2002, 50(3): 364.
- [30] LIU Yong-hui, ZHANG Jing-ni, CUI De-jie, et al(刘永辉, 张静妮, 崔德杰, 等). Acta Pedologica Sinica(土壤学报), 2006, (4): 697.
- [31] Barrcb P, Montagnier C, Chenu C, et al. Plant and Soil, 2008, 302(1-2): 213.
- [32] Pernesdebuyser A, Pernes M, Velde B, et al. Clays & Clay Minerals, 2003, 51(5): 577.
- [33] Moterle D F, Kaminski J, Rheinheimer D D S, et al. Plant and Soil, 2016, 406(1-2): 157.
- [34] Barre P, Velde B, Catel N, et al. Plant and Soil, 2007, 292(1-2): 137.
- [35] HU Xin-ping, SHI Yu-xin, DAI Xue-rong, et al(胡薪苹, 师育新, 戴雪荣, 等). Acta Petrologica et Mineralogica(岩石矿物学杂志), 2013, 32(3): 373.
- [36] CHENG Yong-yi, YAN Ning-zhen, CHEN Hui, et al(程永毅, 严宁珍, 陈慧, 等). Journal of Southwest University(西南大学学报), 2014, 36(3): 86.
- [37] WANG Mei-jia, WANG Feng, SU Si-hui, et al(王美佳, 王泮, 苏思慧, 等). Arid Zone Research(干旱区研究), 2019, 36(2): 331.
- [38] XING Su-li, LIU Meng-chao, HAN Bao-wen(邢素丽, 刘孟朝, 韩保文). Chinese Journal of Soil Science(土壤通报), 2007, (3): 486.

Advances in X-Ray Diffraction for the Determination of Clay Minerals in Soil

XU Lei^{1,3}, YUAN Hui-min^{1,3*}, JIANG Rong-feng^{1,3}, WANG Yan-feng², WU Liang², WANG Sheng-feng²

1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2. Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Fertilizers, Beijing 100193, China

3. Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, Beijing 100193, China

Abstract Soil is composed of particles of different sizes and shapes, among which clay mineral is one of the important parts of soil. It not only contains the formation track, genetic characteristics and changes of soil environment, but also plays a role in retaining and storing nutrients and water in soil. At the same time, due to the fact that different types of clay mineral compositions of the soil are not the same, different ways of using and long-term locating fertilization will have an effect on the evolution of soil clay minerals, so the research on soil clay mineral composition and evolution law can contribute to a more comprehensive understanding of the genetic regularity between different types of soil, which is of great significance to explore the sustainability of soil fertility. At present the study of soil clay minerals has become one of the focus in the study of green agriculture, X-ray Diffraction analysis (X-Ray Diffraction, XRD) as the research of soil clay minerals, the most effective means with the advantages of being convenient, being fast, high accuracy, and being pollution-free, such as on the sample, has received extensive attention from scholars both at home and abroad in recent years. This paper introduces the basic principle and analytical method of soil clay minerals by X-ray diffraction analysis, summarizes the research progress of this technology in soil clay minerals determination at home and abroad, and prospects the application prospect of X-ray diffraction analysis in soil clay minerals determination. Apply XRD to study soil clay minerals and combine with traditional analysis methods to determine the basic properties of soil, which can reveal the composition and differences of clay minerals in different types of soils, as well as the composition and evolution of soil clay minerals under different utilization methods. So as to provide theoretical basis and technical support for the sustainable use of soil fertility and agricultural green development. At present, researches on the evolution of soil clay minerals are mostly focused on long-term fertilization, but there are very few studies on the evolution of soil clay minerals caused by long-term straw return to the field and different farming methods. I believe that in the future XRD can be applied to more aspects of soil research and contribute to the green development of agriculture.

Keywords X-ray diffraction; Clay mineral; Soil type; Land use

(Received Apr. 3, 2019; accepted Aug. 12, 2019)

* Corresponding author