

DOI: 10.11766/trxb201806090273

泰山山前平原土地利用方式对潮棕壤黏土矿物组成的影响*

戚兴超 王晓雯 刘艳丽[†] 李成亮 王卓然 张 民

(土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018)

摘 要 对泰山山前平原潮棕壤区小麦/玉米轮作农田、杨树林地和荒草地三种土地利用方式黏土矿物组成进行研究, 探究不同土地利用方式下黏土矿物组成的变异规律与影响因素。通过野外样地调查、室内土壤黏粒提取及其黏土矿物的X-射线衍射图谱分析等方法分析黏土矿物组成及相关土壤指标。结果表明: 三种利用方式土壤以伊利石(包括结晶好伊利石和结晶差伊利石)为主要矿物, 次要矿物为蛭石和高岭石, 混层矿物为少量矿物组成。荒草地表层土壤伊利石含量最高(75.8%), 分别较农田和林地土壤提高26.4%、23.6%。下层土壤伊利石含量较表层土壤有显著降低, 荒草地土壤的降低幅度较大。结晶好伊利石含量表征土壤的风化程度, 荒草地、林地、农田土壤矿物的风化作用依次增强。蛭石含量在下层土壤的差异显著且较表层土壤含量高, 含量由高到低依次为荒草地、农田、林地。荒草地土壤有机碳含量和钠质分散有机无机复合体含量较林地和农田土壤有显著降低。不同利用方式土壤黏粒中伊利石含量与蛭石含量之间相互转化, 受土壤速效钾含量的调控。荒地建议开垦为林地或草地, 促进土壤有机碳保持和有机无机复合体形成, 抑制黏土矿物在土壤剖面的迁移。

关键词 黏土矿物; X-射线衍射; 土地利用方式; 潮棕壤; 伊利石

中图分类号 S151 **文献标识码** A

黏土矿物是土壤肥力形成的基础物质, 由于颗粒细小和晶体结构性质, 在土壤中具有保持养分的功能, 黏土矿物组成变化势必改变土壤的肥力状况^[1-2]。黏土矿物组成的演变与层状硅酸盐矿物铝氧八面体和硅氧四面体结构层间阳离子的交换作用有关。自然条件下, 土壤中黏土矿物的演变需经历长期过程, 主要受气候与地形条件的影响^[3-4]。而在气候与地形条件相同的条件下, 不同利用方式的土壤因受高强度人为管理措施的影响, 造成土壤养分平衡及理化性质变化, 使得土壤黏土矿物的短期演变过程也得到了证实^[5-7]。

土地利用方式的差异导致植物生长和人为干预程度不同。植被对土壤养分吸收的影响及施肥和耕作等人为管理措施对土壤理化性质的调控势必影响土壤中黏土矿物组成^[8]。开垦后的黑土连续8 a种植水稻、玉米、大豆, 随作物对土壤钾素的吸收, 土壤中伊利石含量和结晶度有不同程度的降低^[7]。经过18 a持续施用钾肥和有机肥处理的水稻土中伊利石含量呈增加趋势^[9]。干旱地区连续10 a种植苜蓿的表层土壤伊利石含量增加^[10]。持续3 a的林地土壤长石添加试验发现, 针叶树种较阔叶树种对长石具有更强的分解作用^[11]。土壤中伊利石的

* 国家重点研发计划项目子课题(2018YFD0200604)和山东省重点研发计划项目课题(2016CYJS05A02, 2017CXGC0301)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFD0200604), the Key Research and Development Program of Shandong Province in China (Nos. 2016CYJS05A02 and 2017CXGC0301)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yanliliu2013@163.com

作者简介: 戚兴超(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事土壤施肥效应研究。E-mail: qixingchao90@163.com

收稿日期: 2018-06-09; 收到修改稿日期: 2018-07-10; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-08-13

变化受土壤溶液中钾离子浓度和植物对钾离子吸收的影响。土壤溶液中钾离子供应不足时,植物可以利用黏土矿物层间的钾离子,而使其他的阳离子进入层间结构而改变黏土矿物的组成;相反,如果土壤溶液的钾离子过剩,由于阳离子的扩散和吸附作用进入黏土矿物层间作为结合态的养分而存在^[8]。

黏土矿物在土壤中主要与土壤有机质结合形成土壤有机无机复合体而存在,而土壤有机无机复合体的形成影响黏土矿物的活性。不同利用方式下黑土黏土矿物组成的研究发现,土壤有机碳与蛭石、蒙脱石的结合程度较高岭石、伊利石高,导致黏土矿物的移动性存在差异^[5]。不同利用方式下耕作与管理措施对土壤颗粒破碎的物理作用影响黏土矿物的组成,泰山山前淋溶土450~2 000 nm黏粒以蛭石为主要黏土矿物,伊利石主要分布于100~450 nm黏粒。随土壤黏粒粒径的减小,黏土矿物的结晶程度变差^[12]。长期定位试验研究发现,随着黏粒粒径减小,黏粒中伊利石含量升高。伊利石含量与作物产量呈负相关关系,该相关性细黏粒伊利石含量较粗黏粒伊利石含量表现得更显著,说明细黏粒中伊利石结合的钾离子更易被作物吸收,伴随结合钾离子的释放,伊利石转化为蛭石的过程增强^[9]。黑土开垦为旱田及水田后,均能促进粉粒和粗砂粒风化,造成土壤脱钾及有机质矿化,使伊利石向蛭石和伊利石-蒙脱石混层矿物转化^[7]。水稻土长期施用钾肥和水稻秸秆还田加快土壤黏粒中蛭石向伊利石的转化过程^[13]。

泰山山前平原属于山东典型潮棕壤区,该区土壤主要由洪冲积作用形成,由于地形与土壤肥力差异,土地利用方式主要以农田、林地和荒草地为主,农林产业对该区农业经济发展具有重要贡献。有关泰山地区不同母质发育棕壤黏土矿物组成的研究发现,侧渗白浆化棕壤黏土矿物以高岭石和蛭石、绿泥石为主,次要矿物为水云母;酸性棕壤以铝绿泥石、铝蛭石和高岭石为主,次要矿物为水云母、蛭石和水云母混层矿物,还有少量蒙脱石^[14]。泰山山前棕壤不同粒径黏粒中黏土矿物组成存在差异^[12]。而对于该区不同利用方式对黏土矿物组成的影响尚未引起关注。本研究选择泰山山前平原潮棕壤区小麦/玉米轮作农田、杨树林地和荒草地三种土地利用方式,通过野外样地调查、室

内土壤黏粒提取及其X-射线衍射(XRD)图谱分析,研究不同利用方式下土壤黏土矿物类型与含量、不同黏土矿物类型之间的转变及其与土壤养分之间的联系,以明确不同利用方式对黏土矿物组成影响的控制因素,该研究结果不仅丰富该区土壤的黏土矿物组成资料,而且可为土壤肥力的保持及土地利用方式的优化提供基础资料和科学依据。

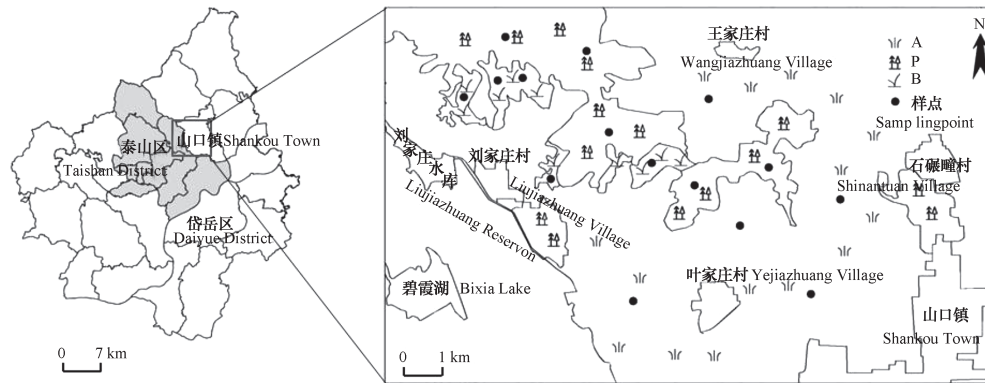
1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于泰安市岱岳区东部山口镇,地理坐标为117° 117' E、36° 7' N,地处泰山东麓,山区与平原的接合部,地势北高南低,是泰莱平原的一部分。该区属暖温带湿润半湿润季风大陆气候,年平均气温15℃,年降水量为500~600 mm,无霜期为204~230 d。该区土壤母质为洪冲积物,土壤类型为潮棕壤,土壤质地为壤土,地形坡度为1°~6°。该区主要土地利用方式为农田、林地和荒草地,占该区总面积的78%,其中,农田属于粮食主产区。由于地形差异和土地利用方式的演替,目前三种土地利用方式的分布见图1。

1.2 野外调查与采样

野外采样前,收集该地区最新的土地利用现状图和遥感影像,利用遥感影像分析软件解译土地利用方式及其分布情况,结合野外调查,根据试验区的主要土地利用格局和变化,同时充分考虑海拔、坡度等相对一致的情况下,选取分布相对集中的小麦/玉米(*Triticum aestivum* L/*Zea mays* L)轮作农田(A)、白杨(*Populus alba*)林地(P)和荒草地(B)3种土地利用方式。农田小麦/玉米轮作年限为15~20 a,作物的覆盖度为80%~85%,农田土壤进行耕作与灌溉,施用氮磷钾化肥和秸秆还田。林地树种以白杨为主,利用年限为9~12 a,林下主要杂草为山苦荬(*Ixeris denticulata*)、菎草(*Humulus scandens* (Lour) Merr)和画眉草(*Eragrostis pilosa* (L) Beauv var *pilosa*),郁闭度为70%~75%。荒草地的利用年限为25~30 a,地被植物为杂草,以狗牙根草(*Cynodon dactylon* (L) Pers)、狗尾草(*Setaria viridis* (L) Beauv)与菎草为主,覆盖度为65%~70%。分别在每种土地利用方式下沿等高线或地形相近、植被长势相近和



注：图中A、P、B分别代表农田、林地和荒草地，下同Note: A, P and B stands for agricultural field, plantation and barren land respectively. The same below

图1 研究区域土地利用方式及样点分布图

Fig. 1 Distribution of land use patterns and sampling points in the research region

利用年限相同的位置选取5个典型样地作为重复。采样时间为2013年3月，具体取样方法参考王修康等^[15]的报道。

1.3 土壤基本理化性质测定

土壤pH：酸度计法；土壤有机碳含量：浓硫酸重铬酸钾氧化外加热法；土壤阳离子交换量（CEC）：中性醋酸铵浸提法；土壤全氮和速效钾含量：常规方法。以上指标具体测定方法参考《土壤农业化学分析方法》^[16]。

土壤有机无机复合体分离：利用胶散分组法分离出水分散复合体（ G_0 ）、钠质分散复合体（ G_1 ）和钠质研磨分散复合体（ G_2 ），通过低温干燥后分别称重，计算各复合体的相对含量^[15]。

黏土矿物组成分析：土壤黏粒分离应用吸管法，分离出的土壤黏粒分别用KCl溶液饱和、 $MgCl_2$ 溶液饱和后与甘油饱和和制作定向玻片，KCl溶液饱和和自然风干后的定向玻片经300℃、550℃加热处理。利用X-射线衍射仪（Brucker D-8 advance，布鲁克公司，德国）分析，X射线衍射分析Cu靶辐射，电压电流分别为40 kV、40 mA，应用步进扫描，步宽0.02，预置时间0.1 s，扫描角度范围（ 2θ ） $3^\circ \sim 35^\circ$ 。扫描制备好的定向玻片，获得黏土矿物的衍射图谱。根据黏土矿物分析方法^[17]鉴定黏土矿物类型，通过XRD-Decomp分析软件（XRD-diagram-decomposition software）^[18]分析黏土矿物组成与含量。

1.4 数据统计

应用SPSS18.0统计软件，对不同土壤理化性

质指标之间的差异应用单因素方差分析（One-way ANOVA）和最小显著差异法（LSD）显著性（ $P < 0.05$ ）检验；利用相关分析方法明确黏土矿物与土壤性质指标之间的关系。

2 结果

2.1 不同土地利用方式土壤基本理化性质

农田土壤pH为5.97，较其他两种土壤有显著降低，下层土壤pH在三种土壤之间无显著差异，均高于表层土壤（表1）。不同土地利用方式表层土壤有机碳含量的大小为：A > P > B。与荒草地土壤相比，农田土壤和林地土壤有机碳含量分别提高330%和142%，处理间差异达到显著水平。林地增加的有机质可能来源于植物根系和凋落物的腐解，耕地土壤有机质的增加不仅来源于作物根系的腐解，而且化肥和有机肥配合施用也会增加根系生物量和微生物量，进而使土壤肥力和土壤固碳潜力增加。三种利用方式下20~40 cm土层土壤有机碳含量均较表层土壤有显著降低。就20~40 cm土层土壤有机碳含量而言，农田与林地之间的差异不显著，但均较荒草地土壤显著增加。

三种土壤CEC大小为：A > P > B，但是农田和林地土壤CEC随土层加深而增加，荒草地土壤则呈降低的趋势。土壤速效钾含量随土层加深呈降低的趋势，三种利用方式间的差异显著，以农田土壤含量最高。表层土壤黏粒含量农田较林地和荒草地有显著增加，但是林地和荒草地之间的差异不显著（表1）。

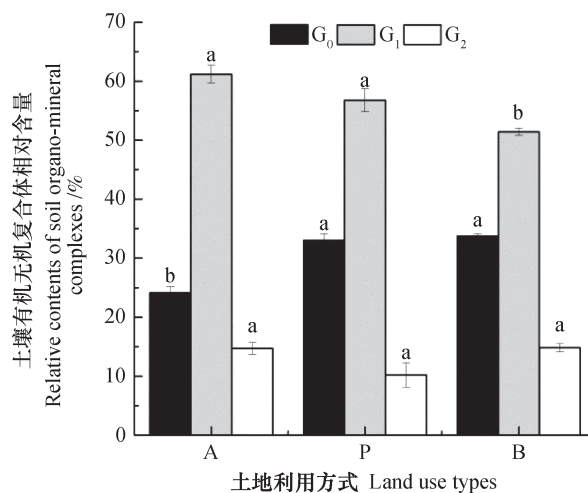
表1 不同土地利用方式土壤部分理化性质指标

Table 1 Selected physicochemical properties of the soil relative to land use patterns						
土层深度 Soil depth /cm	利用方式 Land use pattern	pH	土壤有机碳 Soil organic carbon /(g·kg ⁻¹)	阳离子交换量 CEC /(g·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium /(mg·kg ⁻¹)	黏粒 Clay /(g·kg ⁻¹)
0~20	A	5.97 ± 0.12 b	23.14 ± 0.87 a	18.36 ± 0.36 a	179 ± 6 a	180 ± 6 a
	P	6.67 ± 0.13 a	13.06 ± 0.53 b	11.39 ± 0.56 b	142 ± 5 b	110 ± 11b
	B	6.53 ± 0.08 a	5.38 ± 0.21 c	10.46 ± 0.41 b	109 ± 5 c	90 ± 9 b
20~40	A	6.84 ± 0.06 a	7.27 ± 0.17 a	26.19 ± 1.31 a	158 ± 6 a	—
	P	6.78 ± 0.08 a	6.66 ± 0.21 a	16.58 ± 0.43 b	106 ± 3 b	—
	B	6.73 ± 0.01 a	2.51 ± 0.11 b	7.03 ± 0.37 c	79 ± 11 c	—

注：表中同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同 Note: Different letters in the same column represent significant difference ($P < 0.05$). The same below

利用胶散分组法分离出的有机无机复合体, G_0 组是指分散于水中小于10 μm 的游离矿质颗粒和各种微团聚体或复合体的混合物; G_1 组是继 G_0 组提取后经中性氯化钠溶液处理后钠质分散的小于10 μm 的复合体, 被认为是钙凝结的负电性凝胶或活性凝胶; G_2 组是不能用氯化钠拆开, 但在钠质溶液中经研磨才能分散的小于10 μm 的复合体, 被认为是铁铝氧化物凝结的等电性凝胶或惰性凝

胶。本研究土壤有机无机复合体组成中以 G_1 组为主要组成, 含量范围为51.42%~61.17%, 以A土壤 G_1 组含量最高, 与B土壤之间差异显著, 与P土壤之间的差异不显著(图2)。 G_0 组含量为次要组成, 以A土壤含量最低, 与其他两种土壤之间的差异显著。P与B土壤之间 G_0 组含量无显著差异。有机无机复合体中最小组分为 G_2 组, 含量范围为10.02%~14.85%, 在三种土壤间的差异不显著。



注: G_0 代表水分散复合体、 G_1 代表钠质分散复合体、 G_2 代表钠质研磨分散复合体。同一颜色柱上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同 Note: G_0 , G_1 and G_2 stands for organo-mineral complex under water dispersion, sodium chloride solution dispersion and sodium chloride solution with grinding treatment, respectively. Different letters in the same colour column represent significant difference ($P < 0.05$). The same below

图2 不同土地利用方式土壤有机无机复合体组成

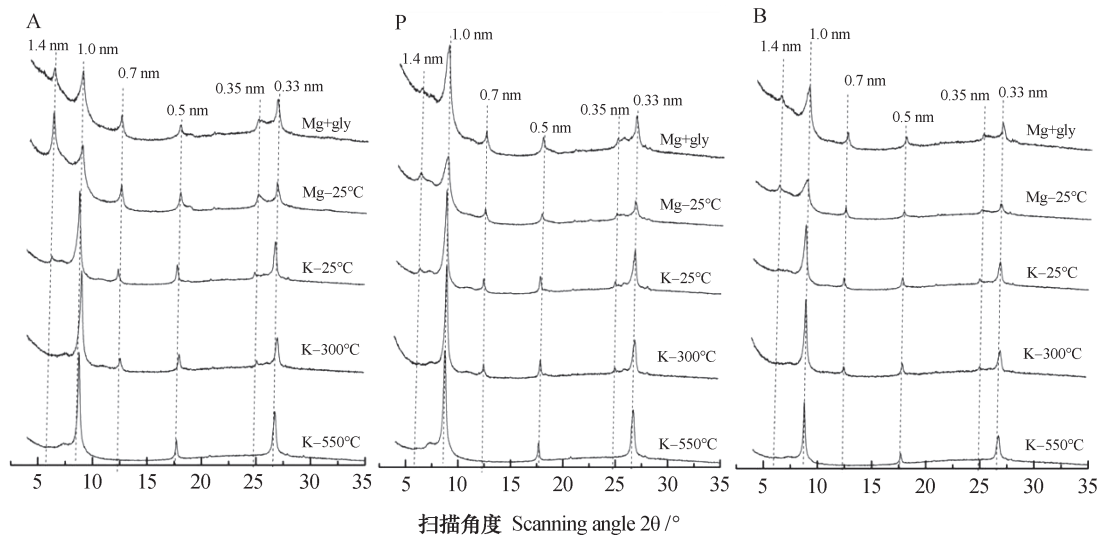
Fig. 2 Composition of soil organo-mineral complexes in the soil relative to land use patterns

2.2 不同土地利用方式土壤黏土矿物类型鉴定
土壤黏粒K离子饱和的定向玻片依次进行自

然风干 (K-25 $^{\circ}\text{C}$)、300 $^{\circ}\text{C}$ (K-300 $^{\circ}\text{C}$)、550 $^{\circ}\text{C}$ (K-550 $^{\circ}\text{C}$) 加热处理, Mg离子饱和和自然风干

处理 (Mg-25 °C)、Mg 离子与甘油饱和处理 (Mg+gly)，然后根据不同处理定向玻片 XRD 衍射图谱黏土矿物层间距 d 值的变化，鉴定主要黏土矿物的类型。从 Mg+gly 处理定向玻片的衍射图谱可以看出，矿物有 6 个显著的衍射峰， d 值分别为 1.4、1.0、0.7、0.5、0.35 和 0.33 nm。K 饱和经 300 °C、550 °C 加热后 1.4 nm 衍射峰消失，说明无绿泥石存在，1.0 nm 衍射峰的强度增加，说明有蛭石存在。0.7 nm、0.35 nm 衍射峰经 550 °C 加热后消失，其他处理未见影响，

说明该峰是高岭石。经过所有处理后 1.0 nm、0.5 nm 衍射峰依然存在，说明该峰是伊利石，0.33 nm 衍射峰不受离子饱和和加热处理的影响，该峰为石英 (图 3)。不同利用方式表层土壤黏土矿物类型相同，矿物衍射峰的相对强度存在差异，利用方式 A 黏土矿物 1.4 nm 峰的相对强度较利用方式 P 和 B 高，利用方式 P 黏土矿物 1.0 nm 峰的相对强度较其他两种利用方式高。不同土地利用方式底层土壤黏土矿物的鉴定过程与表层土壤相同，未列出。



注：Mg+gly 表示镁离子饱和再甘油饱和，Mg-25 °C 表示镁离子饱和和自然风干处理，K-25 °C、K-300 °C、K-550 °C 分别表示钾离子饱和和自然风干后依次进行 300 °C 和 550 °C 加热处理 Note: Mg+gly stands for magnesium saturation followed glycerol saturation, Mg-25 °C for magnesium saturation with air-drying. K-25 °C, K-300 °C, K-550 °C for potassium saturation with air-drying and then heating up to 300 °C, and 500 °C, respectively

图3 不同土地利用方式表层土壤黏粒不同处理定向玻片的XRD-图谱

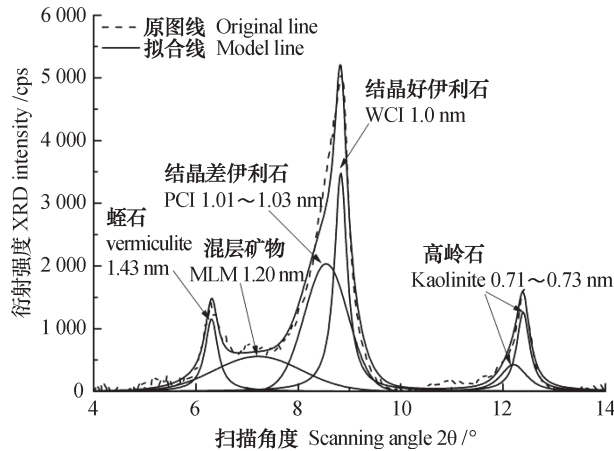
Fig. 3 Original X-ray diffraction patterns of soil clay particles obtained using an oriented specimen slide relative to land use patterns

2.3 不同土地利用方式土壤黏土矿物组成与含量

黏土矿物组成的相对含量通过 XRD-Decomp 分析软件 (XRD-diagram-decomposition software) 分析得到 (图 4)。具体过程为：首先对图谱进行去基线处理，然后进行拟合，准确度达 98% 以上，得到每种矿物衍射峰的层间距、衍射强度和半高宽，具体的衍射峰为蛭石 (层间距为 1.43 nm)、混层矿物 (Mixed layer mineral, MLM) (层间距为 1.20 nm) 和高岭石 (层间距为 0.71 ~ 0.73 nm)，伊利石的衍射峰根据结晶强弱分为结晶好伊利石 (Well crystal illite, WCI) (半高宽小于 0.6，层间距为 1.00 nm) 和结晶差伊利石 (Poorly crystal illite, PCI) (半高宽大于 0.8，层间距为

1.01 ~ 1.03 nm)。衍射峰的面积通过衍射强度和半高宽的乘积计算得到，应用每种矿物衍射峰面积占所有矿物衍射峰面积总和的百分比来表示该种矿物的相对含量。

不同土地利用方式土壤均含有蛭石、结晶好伊利石、结晶差伊利石、混层矿物和高岭石，其含量在不同利用方式土壤之间存在差异。蒙脱石仅在林地表层和农田、荒草地下层土壤有少许含量 (图 4 中未列出)。本研究中三种利用方式土壤黏土矿物组成均以伊利石 (包括结晶好伊利石 WCI 和结晶差伊利石 PCI) 为主，荒草地土壤伊利石含量最高 (75.8%)，与农田和林地土壤间的差异显著，农田和林地土壤伊利石含量分别为 60.0%、61.4%，



注：MLM：混层矿物；PCI：结晶差伊利石；WCI：结晶好伊利石 Note: MLM: Mixed layer mineral, PCI: Poorly crystal illite, WCI: Well crystal illite

图4 XRD-Decomp软件对黏土矿物XRD-图谱的拟合

Fig. 4 Fitting of XRD diagrams of clay minerals with XRD-Decomp software

两者之间的差异不显著（图5）。伊利石含量下层土壤较表层土壤有明显的降低，这种现象在荒草地土壤表现更为突出，下层土壤较表层土壤降低40.4%。伊利石组成中PCI在不同利用方式土壤间的变化规律与伊利石总量的变化相同，不同的是表层土壤三种利用方式土壤PCI的含量无显著差异。WCI含量在不同利用方式下层土壤之间无差异，而表层土壤荒草地含有更多的WCI，并且与其他两种方式有显著的增加。

蛭石含量在表层土壤三种利用方式间的差异不显著，含量范围为6.1%~8.1%；下层土壤中差

异显著且较表层土壤含量高，含量高低依次为B（22.3%）> A（13.8%）> P（9.4%）。表层土壤高岭石含量范围13.4%~15.1%，下层土壤含量范围8.2%~22.8%，不同土壤间的变异规律与蛭石含量相同。但是高岭石含量在土壤剖面上的变化无一致的规律，林地与农田土壤高岭石随土壤剖面的加深而减少，而荒草地高岭石含量却随土壤剖面的加深而增加（图5）。

林地下层土壤较农田土壤含有更多的混层矿物，表层土壤间的差异不显著，且随土层加深混层矿物含量有升高的趋势，农田土壤则呈相反的趋势。

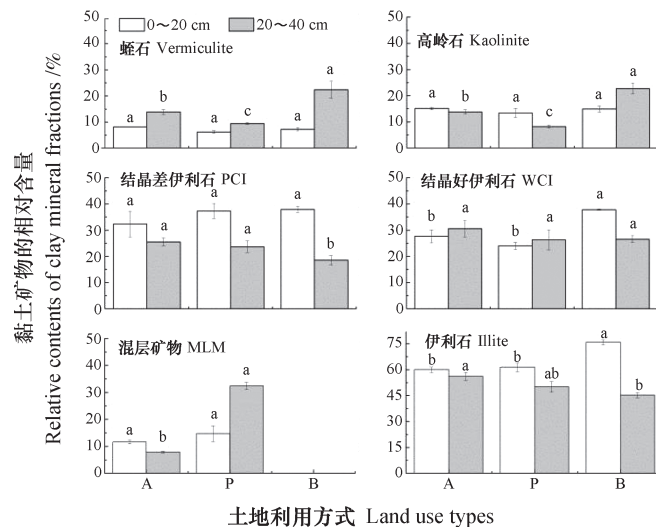


图5 不同土地利用方式土壤黏土矿物组成相对含量

Fig. 5 Relative contents of soil clay mineral fractions relative to land use patterns

2.4 不同类型黏土矿物间的转化

土壤中不同类型黏土矿物之间存在相互转化的过程，对不同黏土矿物组成相对含量进行相关分析，发现伊利石与蛭石相对含量之间存在明显的负相关关系（图6），表明两种黏土矿物

之间相互转化。本研究中伊利石含量与土壤速效钾含量有显著的正相关性，说明黏土矿物的转化受土壤中养分离子浓度的影响。例外的是荒草地表层土壤伊利石含量较高，但是土壤速效钾含量较低。

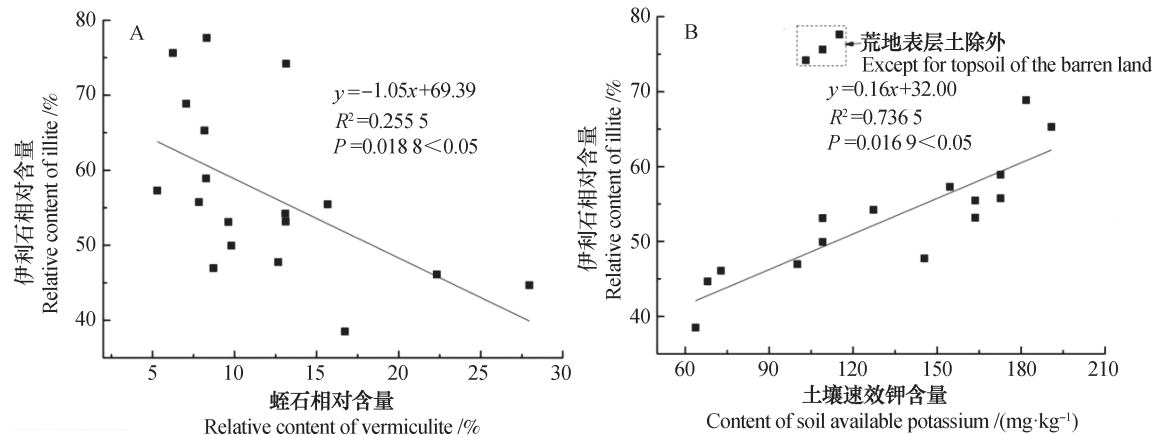


图6 不同土地利用方式土壤伊利石与蛭石相对含量的相关性 (A) 及伊利石相对含量与速效钾含量的相关性 (B)
Fig. 6 Correlation of illite with vermiculite in contents (A) and correlation of relative content of illite with content of soil available potassium (B) relative to land use patterns

3 讨论

黏土矿物组成受不同土地利用方式的影响，并且不同深度土层间也存在差异。该地区表层土壤均含有伊利石、高岭石和蛭石，以伊利石为主要矿物，农田和林地均含有混层型矿物，而在荒草地土壤中未见到。荒草地土壤伊利石含量最高（75.8%），并且与其他两种土壤的差异显著。这一结果较以往报道的山东棕壤农田中伊利石含量（37%）偏高^[14]，可能的原因在文献中报道的资料来自20世纪80年代，当时农田的施肥水平较低，大量的钾随着农作物收获转移出土体，导致伊利石含量降低。荒草地土壤上植被生物量较小，其凋落物全部归还土壤，植被生长对土壤钾素的转移量较小，使土壤中富钾矿物得以保持。而以往报道山东泰安棕壤果园土壤伊利石含量为28%^[19]，与本研究林地土壤伊利石含量为61.4%的结果相比偏低很多，可能的原因在果实收获的经年收获对土壤钾素的消耗较多，促进土壤伊利石层间钾离子转移而转化为其他类型的矿物。本研究结果表明，土壤速效钾含量与伊利石相对含量呈显著的正相关关系（图6 B），验证了伊利石含量对土壤钾库的调

节作用^[20]。土壤中伊利石相对含量与蛭石相对含量呈显著的负相关关系（图6 A），说明两种矿物之间的转化，伊利石层间钾离子的释放伴随钙镁离子的进入，使伊利石的蛭石化过程发生。

不同土地利用方式土壤黏土矿物在土壤剖面上的分布存在差异。表层土壤蛭石相对含量较下层土壤有显著降低，并且荒草地土壤的变化幅度较其他两种土壤高，荒草地高岭石相对含量在土壤剖面具有与蛭石相同的变化趋势。表层土壤结晶差伊利石（PCI）相对含量较下层土壤有显著增加，结晶好伊利石（WCI）相对含量在农田和林地土壤表层与下层的差异不显著，但是荒草地土壤表层较下层有显著增加，并且较其他两种土壤高。说明荒草地土壤黏土矿物的迁移较强，可能是由于该土壤有机碳含量较低，土壤黏粒含量较少（表1），较强的土壤颗粒淋溶作用造成的。土壤黏土矿物在土壤中主要与有机碳结合形成有机无机复合体，不同类型黏土矿物与土壤有机碳的结合强度不同，有研究认为伊利石与有机碳的结合强度较高岭石强^[5]，这解释了表层土壤伊利石含量较高，下层土壤高岭石含量较高的现象。本研究土壤有机无机复合体组成结果表明，钠质分散复合体G₁是具有活性的负电性凝

胶,是形成土壤团粒的基础物质,其含量在荒草地土壤较低,水分散复合体 G_0 是游离的矿质颗粒和微团聚体,其含量在荒草地土壤较高(图2)。荒草地土壤较低含量钠质分散复合体与高岭石、伊利石和蛭石的迁移幅度大致对应,说明土壤有机无机复合体组成影响土壤黏土矿物的迁移性。

土壤中伊利石的结晶度反映土壤矿物的风化作用强弱,结晶度高表征土壤矿物的风化作用弱,反之亦然。以往有关土壤伊利石结晶度的研究通常应用Kübler指数(黏土矿物衍射图谱中1.0 nm峰的半高宽)来表征^[21-22],但是在软件分析衍射图谱的过程中,由于衍射峰并不完全对称,单峰不能很好地拟合伊利石的衍射峰,因而本研究中通过XRD-Decomp图谱分析软件将伊利石衍射峰分离为结晶好伊利石(WCI)和结晶差伊利石(PCI),结晶好伊利石衍射峰的半高宽均小于0.6,其含量可以反映土壤矿物的风化作用。表层土壤中以荒草地WCI含量最高,其次为林地和农田(图5),说明荒草地、林地、农田土壤矿物的风化作用依次增强。农田土壤风化作用强是由于人为施肥耕作措施的高强度干扰。农田钾肥与有机肥的施用使土壤钾素含量提高,促进富钾矿物伊利石含量的提高,随着农田作物收获使土壤钾素转移,加快了土壤钾素的周转与循环,促进土壤富钾矿物的生物与化学风化作用。农田土壤细颗粒组成含量较其他两种土壤高,耕作措施对土壤颗粒的破碎作用加强了土壤矿物的物理风化作用。

4 结 论

三种利用方式土壤均以伊利石为主要矿物,包括结晶好伊利石和结晶差伊利石,次要矿物为蛭石和高岭石,混层矿物为少量矿物。荒草地土壤伊利石含量最高,较农田和林地土壤有显著增加。伊利石含量下层土壤较表层土壤有显著的降低,荒草地土壤的降低幅度较其他两种土壤大。蛭石含量在下层土壤中差异显著且较表层土壤含量高。表层土壤高岭石含量在不同土壤间的变异规律与蛭石含量相同。伊利石与蛭石两种黏土矿物之间相互转化,其转化过程受土壤中钾离子浓度的影响。土壤有机碳含量和钠质分散有机无机复合体的形成抑制黏土矿物在土壤剖面的迁移。荒草地、林地、农田土壤矿

物的风化作用依次增强。

参 考 文 献

- [1] 熊毅. 第一章 土壤胶体研究的重要意义//熊毅, 陈家坊, 等. 土壤胶体. 北京: 科学出版社, 1990
Xiong Y. Chapter one: The significance of soil colloids study//Xiong Y, Chen J F, et al. Soil colloids (In Chinese). Beijing: Science Press, 1990
- [2] Velde B, Barré P. Soils, plants and clay minerals—Mineral and biologic interactions. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2010
- [3] Mirabella A, Egli M. Structural transformations of clay minerals in soils of a climosequence in an Italian alpine environment. *Clays and Clay Minerals*, 2003, 51 (3): 264—278
- [4] Huang C Q, Zhao W, Liu F, et al. Environmental significance of mineral weathering and pedogenesis of loess on the southernmost Loess Plateau, China. *Geoderma*, 2011, 163: 219—226
- [5] Liu Y L, Yao S H, Han X Z, et al. Soil mineralogy changes with different agricultural practices during 8-year soil development from the parent material of a Mollisol. *Advances in Agronomy*, 2017, 142: 143—179
- [6] Cornu S, Montagne D, Hubert F, et al. Evidence of short-term clay evolution in soils under human impact. *Comptes Rendus Geoscience*, 2012, 344: 747—757
- [7] 郑庆福, 赵兰坡, 冯君, 等. 利用方式对东北黑土黏土矿物组成的影响. *矿物学报*, 2011, 31 (1): 139—145
Zheng Q F, Zhao L P, Feng J, et al. Effects of land-use patterns on evolution of clay minerals of black soil in Northeast China (In Chinese). *Acta Mineralogical Sinica*, 2011, 31 (1): 139—145
- [8] Tye A M, Kemp S J, Poulton P R. Responses of soil clay mineralogy in the Rothamsted Classical Experiments in relation to management practice and changing land use. *Geoderma*, 2009, 153: 136—146
- [9] 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. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72: 1580—1590
- [10] Li D, Velde B, Li F, et al. Impact of long-term alfalfa cropping on soil potassium content and clay minerals in a semi-arid Loess soil in China. *Pedosphere*, 2011, 21 (4): 522—531
- [11] Augusto L, Turpault M P, Ranger J. Impact of forest tree species on feldspar weathering rates. *Geoderma*,

- 2000, 96: 215—237
- [12] Zhang Z Y, Huang L, Liu F, et al. Characteristics of clay minerals in soil particles of two Alfisols in China. *Applied Clay Science*, 2016, 120: 51—60
- [13] 廖育林, 鲁艳红, 谢坚, 等. 长期施用钾肥和稻草对红壤双季稻田土壤供钾能力的影响. *土壤学报*, 2017, 54 (2) : 456—467
Liao Y L, Lu Y H, Xie J, et al. Effects of long-term application of chemical potassium fertilizer and incorporation of rice straw on potassium supplying capacity of red soil in double cropping paddy field (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (2) : 456—467
- [14] 叶正丰, 张俊民, 过兴度. 山东省棕壤和褐土的黏土矿物. *山东大学学报 (自然科学版)*, 1986, 21 (3) : 118—126
Ye Z F, Zhang J M, Guo X D. Clay minerals of brown earth and drab soil in Shandong Province (In Chinese). *Journal of Shandong University (Natural Science Edition)*, 1986, 21 (3) : 118—126
- [15] 王修康, 戚兴超, 刘艳丽, 等. 泰山山前平原三种土地利用方式下土壤结构特征及其对土壤持水性的影响. *自然资源学报*. 2018, 33 (1) : 63—74
Wang X K, Qi X C, Liu Y L, et al. Soil structure and its on soil water holding property under three land use patterns in piedmont plain of Mountain Tai (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2018, 33 (1) : 63—74
- [16] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科学技术出版社. 2000
Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese)*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [17] Moore D E, Reynolds R C. X-ray diffraction and the identification of clay minerals. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1997: 378
- [18] Lanson B. Decomposition of experimental X-ray diffraction patterns (profile fitting) : A convenient way to study clay minerals. *Clays and Clay Minerals*, 1997, 45: 132—146
- [19] 孙治军, 马丽, 张民, 等. 山东主要果园土壤的黏土矿物组成及其吸附特征. *水土保持学报*, 2007, 21 (3) : 57—60
Sun Z J, Ma L, Zhang M, et al. Composition of clay minerals and adsorption characteristics of main orchard soils in Shandong (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21 (3) : 57—60
- [20] Barré P, Velde B, Fontaine C, et al. Which 2: 1 clay minerals are involved in the soil potassium reservoir? Insights from potassium addition or removal experiments on three temperate grassland soil clay assemblages. *Geoderma*, 2008, 146: 216—223
- [21] 贾伟丽, 彭淑贞, 张伟, 等. 末次间冰期以来黄土中伊利石结晶度的变化与古环境. *第四纪研究*, 2014, 34 (3) : 553—559
Jia W L, Peng S Z, Zhang W, et al. Variations of illite crystallinity in the Chinese Loess deposits since the last interglacial periods and palaeoclimatic significance (In Chinese). *Quaternary Science*, 2014, 34 (3) : 553—559
- [22] 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. *土壤学报*, 2015, 52 (5) : 991—1001
Liu L H, Hu X F, Ye W, et al. Relationship between illite crystallinity (IC) value and weathering degree of quaternary red clay in southern Anhui Province, southeast China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (5) : 991—1001

Effects of Land Use of Different Patterns on Soil Clay Mineral Compositions in Piedmont Plain of Mountain Tai

QI Xingchao WANG Xiaowen LIU Yanli[†] LI Chengliang WANG Zhuoran ZHANG Min

(National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract 【Objective】 It is well known that soil clay minerals play an important role in sustaining soil fertility, and composition of soil clay minerals vary with vegetation and management systems and land use patterns. A field survey of the piedmont plain of Mountain Tai was carried out on variation of clay

mineral composition in the aquic brown soil with land use, i.e. wheat-maize rotation, poplar plantation and barren land, its affecting factors and its relationship with soil fertility indices. 【Method】 Based on the field survey, soil samples were collected from the fields different in land use for extraction of $< 2 \mu\text{m}$ soil clay particle with pipette method and analysis of composition of the extracted clay and relevant indices with the X-ray diffraction (XRD) method. XRD was applied to the clay samples for XRD patterns after the samples were treated separately with (a) the magnesium saturation and air-drying method, (b) magnesium saturation followed glycerol salvation, or (c) potassium saturation and heating at 300°C or 500°C method. 【Result】 Qualitative analysis of the experimental XRD patterns reveals that the soils, regardless of land use patterns, had illite as dominant clay mineral, which consisted of well crystallized illite (WCI) and poorly crystallized illite (PCI), vermiculite and kaolinite in the next, and mixed-layer minerals the least. Quantitative information of clay mineral fraction derived from the fitting procedure for the different sub-fractions allowed for determination of complex mineralogy of the $< 2 \mu\text{m}$ clay fraction in the soil samples. Results show that the soil samples varied in percentage of clay mineral fractions with land use. The barren land was the highest in illite in the topsoil, reaching 75.8% and being, 26.4%, 23.6% than higher the agricultural soil and plantation respectively. The content of illite was significantly lower in the subsoil than the topsoil, especially for barren land. PCI varied similarly to illite in content. WCI content reflected weathering degree of the soil, hence it increased successively barren land to, plantation and agricultural soil. Vermiculite content in the topsoil was not significantly different between the three different land. However, it varied more remarkably in the subsoil than in the topsoil and in order of as barren land $>$ agricultural soil $>$ plantation. Kaolinite content was similar to vermiculite content in variation in the soils. Barren land soil was lower than the other two in soil organic carbon content and content of inorganic-organic complexes, too. 【Conclusion】 The content of illite in the soil negatively related to the content of vermiculite, but positively related to soil available potassium, which is attributed to the transformation between illite and vermiculite. The content of soil organic carbon and the formation of inorganic-organic complexes with sodium dispersion grows in agricultural soil as affected by tillage, fertilization, and so on, which inhabit movement of the clay minerals in the soil layer, enhance weathering of the soil minerals, and increase availability of the potassium embedded in illite. Nowadays more and more barren land is reclaimed into plantation and meadowland, thus increasing vegetation coverage and hence soil organic carbon content, and controlling erosion of the land.

Key words Clay minerals; X-ray diffraction; Land use pattern; Aquic brown soil; Illite

(责任编辑: 陈荣府)