

土壤黏粒和磁化率特征对绰墩古水稻土成因的指示^①

李学林¹, 李福春^{1*}, 杨梅¹, 代静玉¹, 陈国岩², 杨用钊³

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 浙江嘉兴平湖市当湖街道办事处, 浙江嘉兴 314200;

3 淮安市耕地质量保护站, 江苏淮安 223001)

摘要: 本文研究了绰墩农业遗址 P-02 原状土剖面的粒度分布, 定量分析了土壤黏粒的矿物组成, 测定了土壤/沉积物及其各粒级组分(黏粒、粉砂粒、细砂粒和粗砂粒)的磁化率。结果表明: 在 0~30 cm 和 134~154 cm 两层段, 黏粒含量从下向上有降低的趋势, 这可能预示着长期的水耕作业造成黏粒从表层向亚表层移动; 在 148~200 cm 层段, 土壤磁化率从下向上有降低的趋势, 可能说明该处存在长期淹水的状况。总之, 黏粒含量和质量磁化率数据说明长江下游地区的先民在马家浜文化时期已开始采用“水潲”方式进行水稻的栽培。

关键词: 绰墩; 古水稻土; P-02 剖面; 磁化率; 黏粒; 水潲

中图分类号: S151 **文献标识码:** A

我国稻作农业的起源问题在学术界向来就存在争议。归纳起来大致有印度说、东南亚说、华南说、云南说和长江下游说等^[1]。之所以有如此多的观点, 主要是由于我国史前稻作遗存的分布十分广泛。20 世纪 70 年代, 考古工作者在浙江余姚河姆渡发现了距今 6 500 a(6 500 a BP)的稻谷遗存和稻作农具^[2]。此后又有许多史前稻作遗存被陆续发现(至少有 70 多处)^[1], 它们遍布华南地区、长江中下游地区和黄河流域^[3]。到目前为止, 世界上发现并得到广泛认可的古水稻土剖面仍很稀缺。考古学家在江苏苏州草鞋山、昆山绰墩^[4]和浙江萧山跨湖桥农业遗址^[5]中发现的古水稻田为土壤学家与考古学家进行合作研究创造了绝好的机会。

2003 年下半年, 苏州市博物馆、苏州市农业环境检测站和昆山市文物保护管理所等单位联合对绰墩遗址第 VI 工作区进行了第 6 次发掘^[4]。应中国科学院南京土壤研究所曹志洪研究员的要求, 在考古现场选择性地挖掘了 3 个土壤剖面, 编号分别为 P-01、P-02 和 P-03(深度均为 2 m)。土壤学工作者按土壤发生层在 P-01 和 P-03 剖面各采集了 12 个样品^[6-7]。有关 P-01 和 P-03 剖面的研究论文已陆续发表多篇, 除少数几篇有关考古学的研究以外, 其余大多数论文围绕土壤学开展了工作, 研究工作包括土壤肥力特征^[8]、

孢粉学特征^[9]、碳化稻粒年龄^[10]、成土母质^[11]、耕作措施^[12-13]、黏土矿物特征^[14]等。从时间尺度上来看, 基于 P-01 和 P-03 两剖面的研究精度比较有限; P-02 剖面以完整的原状土形式保存, 因此, 针对该剖面开展工作有望更精确地研究其土壤学特征, 为丰富和发展水稻土的形成理论积累资料。

土壤的粒度分布特征不仅可以用来判别土壤的母质来源, 而且有助于恢复古环境^[11]。通常认为, 土壤黏粒是在土壤的形成和演化过程中形成的细粒组分^[15]。因此, 研究黏粒含量在土壤剖面上的变化规律有助于剖析土壤的形成过程。对现代水稻土的研究表明, 黏粒的淋失现象普遍存在于荒地土壤被水耕之后。随着水耕过程的进行, 耕作层的黏粒含量下降^[16]。同样, 黏土矿物作为黏粒的最主要矿物类型, 其矿物组合及其中各种矿物相对含量的变化对(古)土壤的成因也具有一定的指示意义。另外, 中国黄土高原黄土的磁性地层学研究表明, 古土壤层的磁化率通常高于黄土层, 而且黄土-古土壤序列的磁化率曲线能准确地指示古气候的多旋回变化^[17]。因此, 磁化率被作为古气候的代用指标而得到广泛的应用。尽管在古土壤磁化率增强的机制方面还存在多种看法, 但对于旱地土壤来说, 成土过程中超顺磁强磁性矿物(磁铁矿和/或磁赤铁矿, 粒径<0.03 μm)的生成说^[18]得到了最

基金项目: 国家自然科学基金项目(40573057 和 40571088)和国家自然科学基金重点项目(DO115-40335047)资助。

* 通讯作者(fchli@njau.edu.cn)

作者简介: 李学林(1980—), 女, 宁夏中卫人, 硕士, 实验师, 主要从事土壤地球化学方面的研究。E-mail: lixuel@njau.edu.cn

广泛的认同。在水稻土的形成过程中则存在相反的作用。在淹水(还原)条件下,强磁性矿物(如磁铁矿和/或磁赤铁矿)向弱磁性矿物(如纤铁矿、针铁矿等)甚至无定形氧化铁的转变是水稻土磁化率降低的主要机制^[19-20]。到目前为止,在古水稻土的研究过程中还极少涉及粒度和磁化率特征方面,仅见笔者所在课题组的一篇论文报道了绰墩 P-01 和 P-03 两剖面的粒度分布和磁化率的数据^[21]。不过,针对考古遗址的文化剖面,倒是有几篇论文研究了磁化率特征^[22-24]。总之,对于现代水稻土的研究结果表明,粒度和磁化率数据有可能为判断土壤剖面是否经历过淹水过程提供重要的证据。为此,本文重点讨论了黏粒含量和磁化率沿绰墩 P-02 剖面的垂直变化及其所蕴含的环境信息。

1 材料与方 法

1.1 P-02 剖面特征

绰墩农业遗址中心位置位于 120°50'E, 31°25' N^[6], 行政区划上属于昆山市正仪镇绰墩山村,南距正仪镇 2 km,东距昆山市区 10.5 km,其东、西分别是傀儡湖和阳澄湖,地面海拔一般在 3 m 以下^[6]。绰墩遗址的最大特点是存续时间长,从新石器时期的马家浜文化、崧泽文化和良渚文化,延续到铜石并用时代的马桥文化^[25]。P-02 剖面位于 P-01 剖面以南 10 m 处^[26],剖面深 2 m,以 2 cm 为间距被分成 100 个样品。按土壤颜色,整个剖面可以分为 14 层^[26]。在 130~150 cm 层段有肉眼可见的陶瓷碎片和用吸铁石可吸出的磁性颗粒。

1.2 样品分组

取 20 g 左右的风干样品,用 10% 的盐酸处理以除去其中的碳酸盐,然后用 30% 的双氧水去除有机质,洗去多余的盐基离子,过 80 目筛并获得 >200 μm 的粗砂粒组分(仅用于测定磁化率)。之后,将 <200 μm 的部分转移到 1 L 量筒中制成悬浊液。根据 Stokes 定律用沉降-虹吸法将样品分成黏粒(<2 μm)、粉砂粒(2~20 μm)和细砂粒(20~200 μm)3 个粒级组分。粉砂粒和细砂粒样品直接制成定向风干片。将黏粒样品分成两份,一份用于 KCl 饱和处理,另一份用于 MgCl₂ 饱和处理,处理后制成定向风干片。KCl 和 MgCl₂ 饱和处理过的样品经 X-射线衍射仪(XRD)测定后根据具体情况再分别进行加热处理(550℃, 2 h)和甘油饱和处理。另取一部分土壤样品用吸铁石吸取其中的磁性颗粒,将吸取出的磁性颗粒研磨至 200 目并制成定向风干片。

1.3 测定方法

1) 矿物成分的测定和数据处理方法:利用 D_{max}-B

型 XRD 获得衍射数据。测试条件为:Cu 靶,管压 35 kV,管流 20 mA,扫描速度(2θ)2°/min,扫描范围为 3°~60°。利用 Jade 6.0 软件分析 XRD 图谱,采用积分强度法对黏粒中矿物含量进行计算。伊利石、高岭石和蒙脱石的系数分别为 3、2 和 1.5^[27]。

2) 土壤粒度分布的测定方法:取 2~3 g 土壤样品,去除有机质和碳酸盐后加入 10 ml 六偏磷酸钠(0.05 mol/L),并用超声波振荡 10 min,制成悬浊液。将悬浊液移入样品槽,用仪器自带的超声波系统再振荡 30 s,然后利用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定粒度分布(以体积分数计)。测量范围为 0.05~1 000 μm,分析误差 <2%。

3) 磁化率的测定方法:利用国土资源部南京地质矿产研究所 HKB-1 型卡帕桥磁化率仪测定样品的体积磁化率。质量磁化率=(量程×体积磁化率)/质量。测定误差 ±0.5%。

2 结果与分析

2.1 土壤粒度分布特征

绰墩农业遗址 P-02 土壤剖面黏粒含量介于 3.69%~14.63%(平均 7.51%,以颗粒体积分数计,下同)。总体上看,黏粒含量的变化幅度较小,但 0~30 cm 和 134~154 cm 两层段的异常比较明显(图 1A)。从表层到 30 cm 深度,15 个样品中的黏粒含量总体上均高于其以下的所有样品,其平均值为 11.06%,远远高于整个剖面的平均值(7.51%)。从图 1A 还可以看出,从 30 cm 深处向上,黏粒含量有降低的趋势。在 134~154 cm 层段,黏粒含量有一个明显的低值区(平均 4.62%,146~148 cm 层段最低,仅 3.69%)。该层段也是粉砂粒含量的低值区和细砂粒含量的高值区(图 1B、C)。这似乎可以看作是从剖面底部向上直至 146 cm 处,黏粒和粉砂粒含量呈现逐渐降低的过程。

2.2 黏土矿物组成特征

本研究测定了绰墩农业遗址 P-02 土壤剖面黏粒、粉砂粒和细砂粒所有样品的 XRD 图谱(共 400 个)。结果表明,相同粒级组分的矿物组成基本相同,各样品之间的差异主要表现在矿物比例上。本文以深度为 168~170 cm 的样品为例展示其 XRD 图谱。细砂粒和粉砂粒中的矿物以石英为主,含少量长石和云母(图略)。KCl 饱和处理的样品中出现晶面间距(*d* 值)为 0.714 nm 和 0.357 nm 的衍射峰(图 2),加热处理后该二衍射峰消失^[6]。因而可以确定,*d* 值为 0.714 nm 和 0.357 nm 的衍射峰属于高岭石,样品中不存在绿

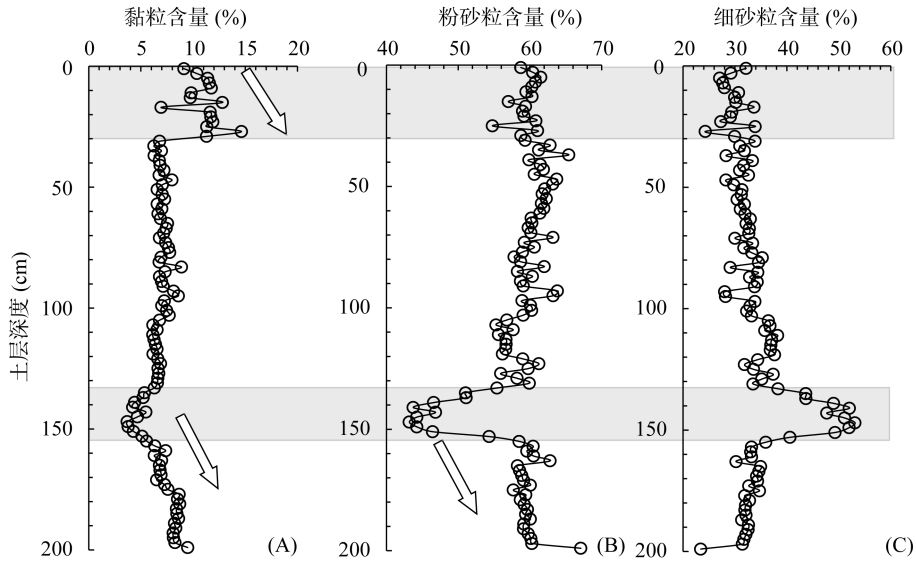
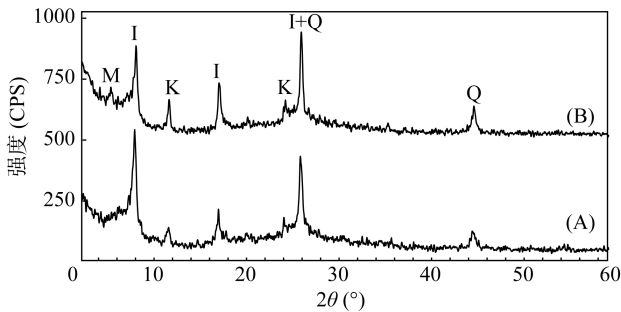


图 1 土壤剖面中黏粒(A)、粉砂粒(B)和细砂粒(C)的垂直分布(图中箭头所指的方向代表颗粒移动的方向)
Fig. 1 Vertical distribution of clay (A), silt (B) and fine sand (C) fractions in soil profile



(A 图谱为 $MgCl_2$ 饱和处理, B 图谱为 KCl 饱和处理; M 表示蒙脱石, I 表示伊利石, K 表示高岭石, Q 表示石英)

图 2 土壤深度 168 ~ 170 cm 样品中黏粒的 XRD 图谱
Fig. 2 X-ray diffraction patterns of clays of soil samples from 168 ~ 170 cm

泥石。 $MgCl_2$ 饱和处理的样品中出现 d 值为 1.438 nm 的衍射峰(图 2), 用甘油处理后该衍射峰向低角度方向移动^[6]。由此可以确定, 该衍射峰属于蒙脱石(而非蛭石)。因此, 该剖面黏粒组分中的矿物以伊利石和高岭石为主, 含少量蒙脱石(个别样品中存在少量石英)。定量计算结果表明, P-02 剖面中伊利石所占比例最大, 其平均值高达 85%(变化于 61.11% ~ 100%); 高岭石居次, 平均值为 12.76%(0 ~ 31.50%); 蒙脱石平均含量仅 2.28%(变化于 0 ~ 7.86%)。

2.3 土壤磁化率特征

由黏粒、粉砂粒、细砂粒和粗砂粒 4 个粒级样品的磁化率垂直分布曲线(图 3)可以看出, 磁性颗粒主要存在于黏粒和粗砂粒之中(其质量磁化率(MS)平均值分别为 $18.90 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $39.92 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$), 而粉砂粒和细砂粒对 MS 的贡献较小(MS 平均值分别为 $8.67 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $8.17 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)。尤为突出的是

在 140 ~ 150 cm 层段粗砂粒的 MS 高达 $564.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 这比粉砂粒和细砂粒级的众数值高 2 个数量级。另外, 本研究用吸铁石分选出一些肉眼可见的磁性颗粒, 称重后绘成磁性矿物含量分布图(主要见于 5 个样品, 其深度分别为 28 ~ 30、64 ~ 66、140 ~ 142、142 ~ 144 和 144 ~ 146 cm, 图略)。对比发现, 磁性矿物含量分布图与土壤磁化率的变化趋势(图 4A)基本一致。这些都说明, 磁性矿物(主要是磁铁矿、磁赤铁矿和赤铁矿, XRD 图略)主要分布于粗粒中。P-02 剖面中的粗粒磁性矿物有可能来自于陶瓷碎片, 与成壤作用无关。从图 3A 可以看出, 黏粒级样品的磁化率有两个低值区, 其一位于地表附近, 另一个位于 158 ~ 182 cm 层段, 这两个磁化率低值区可能是长期淹水导致的结果。

P-02 剖面土壤 MS 变化于 $4.28 \times 10^{-8} \sim 53.09 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 平均为 $11.36 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。在 140 ~ 148 cm 层段, 磁化率明显高于其他层段(图 4A), 这可能是受到了陶瓷碎片中磁性颗粒的影响; 在 148 ~ 200 cm 层段, 从下向上, 磁化率呈现出在波动中逐渐降低的趋势(图 4B)。

3 讨论

在 2003 年 4 月和 2003 年 11 月的两次发掘过程中, 绰墩遗址共出土了 46 块考古学意义上的“水稻田”^[4]。曹志洪等^[7]认为这些马家浜时期(6 280 a BP)的稻田是迄今世界上最早的灌溉稻田。土壤学工作者针对 P-01 和 P-03 剖面(主要是 P-01 剖面)开展了相当系统的研究工作。古水稻花粉、水稻植硅体和碳化稻

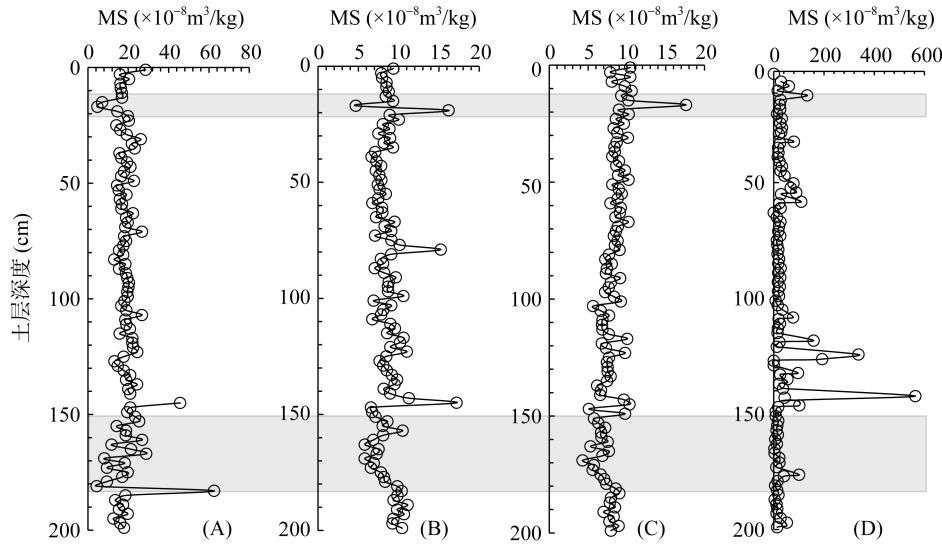


图 3 土壤剖面中黏粒(A)、粉砂粒(B)、细砂粒(C)和粗砂粒(D)磁化率的垂直变化

Fig. 3 Vertical distribution of magnetic susceptibility of clay(A), silt(B), fine(C) and coarse sands(D) fractions in soil profile

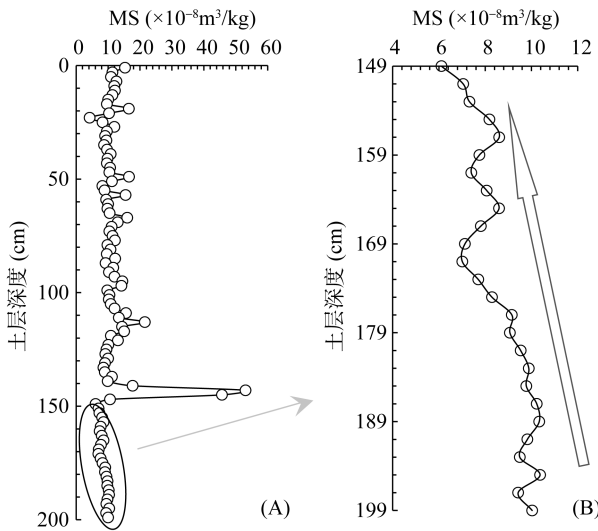


图 4 土壤/沉积物全样磁化率的垂直变化(A)及其局部放大图(B)

Fig. 4 Vertical distribution of magnetic susceptibility of bulk soil/sediment in soil profile (A) and partial enlarged detail (B)

粒的分布特征表明绰墩遗址及其附近曾经有水稻生长^[9, 28]。根据碳化稻粒的形状及其蛋白石含量判断, 该处生长的水稻应为人工栽培的粳稻^[7, 29]。多环芳烃(PAHs)特征^[30]和碳化稻粒的¹³C核磁共振谱特征^[10, 13]提供了“火耕”的证据。全磷和有效磷结果表明古代先民可能已开始有意识地利用动物残留物进行肥田^[12]。此外, 基于对 P-02 剖面中挑选出的黑炭之¹³C核磁共振谱的研究^[26]也得出了其来源于“火耕”的结论。为了对考古学意义上的“古水稻田”进行土壤学上的界定, 还需要土壤剖面分异、黏粒移动、磁化率变化等土壤学特征的佐证^[12]。曹志洪等^[7]在 P-01 剖

面中分辨出 A(耕作)层、Ap(犁底层)、B(心土)层和 C(母质)层的分异, 丰富了土壤学方面的证据。

水稻土是在种植水稻或以植稻为主的耕作制度下, 土壤经常处于淹水还原、排水氧化、水耕粘闭以及大量施用有机肥等频繁的人为管理措施影响下形成的^[16]。在长期的水稻栽培过程中, 由于受人类耕作活动和氧化还原交替等物理化学作用的影响, 种植水稻的土壤会在物理结构、化学成分等方面形成与非水稻种植土壤有明显差异的特征。对现代水稻土的研究表明, 黏粒的淋失现象普遍存在于荒地土壤水耕利用之后^[16]。随着水耕过程的进行, 黏粒含量下降。因此, 若能够在土壤剖面上找到黏粒向下移动的证据, 就可以确定该土壤是水稻土, 因为只有长期淹水耕作条件下才有黏粒向下淋洗移动的条件^[12]。

3.1 粒度特征对古水稻土成因的指示意义

水耕利用条件下土壤黏粒含量的降低与水耕造成的黏粒的机械淋失有关, 包括沿着土壤孔隙向下层移动的垂直淋失(即从表层淋洗并向亚表层移动)和灌溉水排泄过程中耕层黏粒的水平流失^[16]。稻田土壤氧化还原条件的交替变化造成的铁解作用会使黏粒遭到破坏, 最终也可能导致黏粒含量降低^[31]。尽管自然界中含铁的磁性矿物普遍存在, 但其含量极低($\ll 1\%$)^[32]。黏粒的主要成分是黏土矿物, 含铁矿物的含量也不会很高。因此, 在导致黏粒含量降低的贡献方面, 铁解作用应该远小于黏粒的淋失作用。P-02 剖面 0~30 cm 和 146~200 cm 层段显示出的黏粒含量自下而上降低有可能是长期的水耕作业所致。该结果很好地印证了在 P-01 剖面获得的 130~200 cm 层段

和 0 ~ 42 cm 层段存在着黏粒垂直淋失现象的结论^[6]。

3.2 黏土矿物组成特征对古水稻土成因的指示意义

已有的研究表明, 埭墩古水稻土是在下蜀黄土之上发育而成^[11]。因此, 对比分析埭墩土壤与下蜀黄土的矿物组成有助于讨论埭墩古土壤的成因。正如本文 2.2 所述, P-02 剖面土壤中伊利石、高岭石和蒙脱石平均含量分别约为 85%、13% 和 2%。南京老虎山下蜀黄土剖面中, 主要黏土矿物为伊利石、蒙脱石和高岭石, 其平均含量分别约为 50%、37% 和 13%^[33]。对比可以发现, 前者的伊利石含量高于后者, 蒙脱石含量则相反, 而二者的高岭石含量相近。由此推测, 埭墩 P-02 剖面中伊利石含量高而蒙脱石含量低很可能是蒙脱石发生伊利石化的结果。

蒙脱石与伊利石在结构上的区别主要是层间阳离子种类不同。前者以水合的 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 Mg^{2+} 为主, 后者的层间以 K^{+} 为主(而非水合钾离子)。一般认为在气候湿热条件下, 伊利石有可能脱钾而变成蒙脱石, 甚至进一步分解为高岭石^[34]。在适宜的条件下, 特别是在环境中存在 K^{+} 时, K^{+} 可以取代蒙脱石层间的水合 Ca^{2+} 和水合 Na^{+} , 使蒙脱石逆向加钾而发生伊利石化, 特别是在有微生物参与的条件^[36]。蒙脱石的伊利石化在本质上是层间加钾、脱水和硅氧四面体加铝去硅的过程^[36]。蒙脱石转变为伊利石后结构上更为稳定^[37]。

3.3 磁化率特征对古水稻土成因的指示意义

南京老虎山下蜀黄土/古土壤的磁化率介于 $56.50 \times 10^{-8} \sim 184.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 平均 $146.93 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ^[33]。可见, 埭墩 P-02 剖面土壤的磁化率远远低于下蜀黄土, 前者的最高值($53.09 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)比后者的最低值($56.50 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)还略低。在长期淹水条件下, 土壤中的强磁性矿物(如磁铁矿和磁赤铁矿)会发生还原分解、水化而转变为弱磁性矿物(纤铁矿、针铁矿等)甚至无定形氧化铁。这导致水稻土的磁化率低于一般地带性土壤^[19]。旱地土壤和水稻土在磁化率方面最突出的差别表现在, 前者的磁化率与总有机碳(TOC)显著正相关, 而后者的磁化率与 TOC 显著负相关, 并且随种稻年限的增加而降低^[19]。因此, 在 P-02 剖面 148 ~ 200 cm 层段和 P-01 剖面 130 ~ 200、0 ~ 42 cm 两层段^[6], 磁化率从下向上降低有可能说明埭墩遗址 P-02 和 P-01 剖面所在位置曾长期处于淹水状态。史威等^[22]在研究重庆中坝考古遗址的磁化率时发现, 碎陶片集中(尤其是红陶)的文化层表现为高磁化率值, 并认为高磁化率值可能与古人高强度用火、大规模燃烧等事件有关。因此, 本研究推测埭墩 P-02 剖

面 140 ~ 148 cm 层段的磁化率增高可能是古代先民用火烧制的陶瓷碎片分散于此层位的结果。

4 结论

在 P-02 剖面 0 ~ 30 cm 和 134 ~ 154 cm 两层段, 黏粒含量从下向上有降低的趋势, 这可能预示着长期的水耕作业造成黏粒从表层淋洗进入亚表层。在 148 ~ 200 cm 层段, 磁化率从下向上逐渐降低的趋势也说明该处存在长期淹水的状况。与土壤母质(下蜀黄土)相比, 土壤中伊利石含量增加而蒙脱石含量相应地减少很可能说明蒙脱石较广泛地发生了伊利石化。本文研究结果连同前人关于土壤剖面分异^[7]、存在“淹水”^[6]和“火烧”^[26]等方面的证据一起, 比较有力地说明了埭墩农业遗址中蕴含着古代先民以“火耕水耨”方式进行耕作的丰富信息。

致谢: P-02 原状土剖面为苏州市博物馆、苏州市农业环境检测站和昆山市文物保护管理所三单位直接赠予, P-01 和 P-03 剖面的部分样品为中国科学院南京土壤研究所曹志洪研究员课题组馈赠, 苏州市土壤肥料站站长王梅农先生陪同课题组成员考察埭墩农业遗址并介绍了遗址的基本情况, 国土资源部南京地质矿产研究王立波高级工程师在测定磁化率方面提供了便利条件, 在此向上述单位和个人表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 严文明. 再论中国稻作农业的起源[J]. 农业考古, 1989(2): 72-83
- [2] 游修龄. 对河姆渡遗址第四文化层出土稻谷和骨稻的几点看法[J]. 文物, 1976(8): 20-23
- [3] 彭博. 中国早期稻作农业遗存及相关问题[J]. 农业考古, 2016(1): 40-45
- [4] 丁金龙. 长江下游新石器时代水稻田与稻作农业的起源[J]. 东南文化, 2004(2): 19-23
- [5] Zong Y, Chen Z, Innes J B, et al. Fire and flood management of coastal swamp enabled first rice paddy cultivation in east China[J]. Nature, 2007, 449: 459-462
- [6] 杨用钊, 李福春, 金章东, 等. 埭墩遗址中存在全新世水稻土的新证据[J]. 第四纪研究, 2006, 36(5): 864-871
- [7] 曹志洪, 杨林章, 林先贵, 等. 埭墩遗址新石器时期水稻田、古水稻土剖面、植硅体和炭化稻形态特征的研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 838-847
- [8] 卢佳, 胡正义, 曹志洪, 等. 长江三角洲埭墩遗址埋藏古水稻土肥力特征研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(1): 109-117
- [9] 萧家仪, 郭平, 王丹, 等. 太湖平原全新世中晚期古植被、古环境与古文化——以苏州埭墩遗址为例[J]. 南京师范大学学报(自然科学版), 2004, 27(2): 91-97

- [10] Cao Z H, Ding J L, Hu Z Y, et al. Ancient paddy soils from the neolithic age in Yangtze river delta[J]. *Naturwissenschaften*, 2006, 93: 232–236
- [11] 杨用钊, 李福春, 曹志洪, 等. 昆山绰墩古土壤粒度特征及母质判别[J]. *土壤通报*, 2007, 38(1): 222–230
- [12] 曹志洪. 中国史前灌溉稻田和古水稻土研究进展[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 784–791
- [13] 胡林潮, 李夏, 刘本定, 等. 绰墩农业遗址古碳化稻粒有机结构研究及与其起源的可能关系[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(8): 978–985
- [14] 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
- [15] 朱显谟, 赵景波. 黄土与红褐色古土壤中粘土胶膜的形成及其意义[J]. *世界科技研究与发展*, 1998, 21(1): 17–22
- [16] 李忠佩, 李德成, 张桃林, 等. 红壤水稻土肥力性状的演变特征[J]. *土壤学报*, 2003, 40(6): 870–878
- [17] Kukla G, Heller F, Liu X M, et al. Pleistocene climate in China dated by magnetic susceptibility[J]. *Geology*, 1988, 16: 811–814
- [18] Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variation in Chinese loess[J]. *Nature*, 1990, 346: 737–739
- [19] 吴培祥, 南相日, 江耀宗. 吉林省水稻土的磁化率特征及其分类问题[J]. *吉林农业大学学报*, 1990, 12(3): 51–54
- [20] 黄来明, 邵明安, 陈留美, 等. 水耕人为土时间序列铁氧化物与磁化率演变特征[J]. *土壤学报*, 2017, 54(1): 1–13
- [21] 史威, 朱诚, 徐伟峰, 等. 重庆中坝遗址剖面磁化率异常与人类活动的关系[J]. *地理学报*, 2007, 62(3): 257–267
- [22] 谭洁, 周卫军, 陈恋, 等. 澧阳平原杉龙岗遗址埋藏古水稻土磁性矿物特性[J]. *土壤*, 2017, 49(5): 1032–1037
- [23] 何翔宇, 吴克宁, 查理思, 等. 古人类活动对土壤理化性质的影响—以河南仰韶村文化遗址为例[J]. *土壤*, 2017, 49(5): 1038–1048
- [24] 郑秀文. 试析绰墩遗址早期先民的生计形态. *农业考古*, 2017(4): 14–19
- [25] Hu L C, Cao Z H, Gu M, et al. Evidence for a neolithic age fire-irrigation paddy cultivation system in the lower Yangtze River delta, China[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2013, 40: 72–78
- [26] Gorbunov N I. Mineralogy and physical chemistry of soils[M]. Science Press, Moscow, 1978, 77–94 (in Russian)
- [27] 李春海, 章钢娅, 杨林章, 等. 绰墩遗址古水稻土孢粉学特征的初步研究[J]. *土壤学报*, 2006, 43(3): 452–460
- [28] 汤陵华. 绰墩遗址的原始稻作遗存[J]. *东南文化*, 2003(增刊 1): 46–49
- [29] 李久海, 董元华, 曹志洪, 等. 6000 年以来水稻土剖面中多环芳烃的分布特征及来源初探[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 41–46
- [30] Brinkman R. Ferrollysis: A hydromorphic soil forming process[J]. *Geoderma*, 1969, 3(3): 199–206
- [31] 俞劲炎, 卢升高. 土壤磁学[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1991: 104–146
- [32] Li F C, Jin Z D, Xie C R, et al. Roles of sorting and chemical weathering in geochemistry and magnetic susceptibility of the Xiashu loess, East China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29: 813–822
- [33] 任磊夫. 试论粘土矿物转化过渡结构[J]. *沉积学报*, 1988, 6(1): 80–87
- [34] Ren X Y, Li F C, Cai Y F, et al. *Paenibacillus* sp. strain SB-6 induces weathering of montmorillonite: Illitization and formation of calcite[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2017, 34(1): 1–10
- [35] Pollastro R H. Considerations and applications of the illite/smectite geothermometer in hydrocarbon-bearing rocks of miocene to mississippian age[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1993, 41(2): 119–133
- [36] 杨献忠, 叶念军. 蒙脱石伊利石化过程中伊-蒙混层形成的 Gibbs 自由能[J]. *地质地球化学*, 2003, 31(3): 20–25

Significance of Clay Fraction and Magnetic Susceptibility for Origin of Ancient Paddy Soil at Chuodun Agriculture Site

LI Xuelin¹, LI Fuchun^{1*}, YANG Mei¹, DAI Jingyu¹, CHEN Guoyan², YANG Yongzhao³

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2 Subdistrict Office of Danghu, Jiaying, Zhejiang 314200, China; 3 Farmland Quality Protection Station, Huai'an, Jiangsu 223001, China)

Abstract: Vertical changes of grain fractions, mineral components and magnetic susceptibility along P-02 profile of the ancient soil at Chuodun Agriculture Site were studied. The results indicated that clay content in the profile decreased from 30 to 0 cm and from 154 to 134 cm, possibly implying that long flooding resulted in the removal of clays from the surface to subsurface. The decrease of magnetic susceptibility from 200 to 148 cm indicates that the place was in long-term flooding state. The above results demonstrate that the ancient peoples lived in the lower reaches of the Yangtze River cultivated rice by using “flood management” during Majiabang culture period.

Key words: Chuodun; Ancient paddy soil; P-02 profile; Magnetic susceptibility; Clay; Flood management