绰墩遗址古今水稻土黏土矿物特征比较研究①

程月琴[1,2]， 杨林章[1*]， 曹志洪[1]

（1 中国科学院南京土壤研究所，南京 210008； 2 中国科学院研究生院，北京 100049）

摘 要： 在江苏绰墩山遗址考古发掘中，发现了在剖面不同深度埋藏的距今约 6 000 年的史前水稻土层、距今约 3 000 年的商周史前的古水稻土层和现代水稻土层。本研究为了比较古今水稻土黏土矿物特征的差异，以土壤剖面 P01（包含史前古水稻土、商周史古水稻土和现代水稻土）与 P03（仅含商周时期古水稻土和现代水稻土）为对象，测定其各种形态铁锰氧化物含量和黏粒矿物组成。对绰墩遗址两古水稻土剖面黏土矿物特征进行研究，结果表明：古今水稻土全铁含量的差异较小。与 6 000 年前古非水稻土相比，6 000 年前古水稻土剖面出现铁锰和蒙皂石类矿物随水流失的现象。古今水稻土黏土矿物组成都是以水云母和蒙皂石为主，但是古水稻土 1.41 nm 的过渡性黏粒矿物强度低于现代水稻土。现代土壤和古土壤中黏土矿物的演变规律相似，为水云母→蛭石、绿泥石→蒙皂石。

关键词： 绰墩遗址；古水稻土；黏土矿物；铁锰氧化物；特征

中图分类号： S152.1

稻米是我国及亚洲、非洲、拉丁美洲大多数发展中国家人们的主食，也是发达国家人们喜爱的粮食之一。我国水稻种植面积为 29.3×10^6 hm^2，约占世界水稻总面积的 19%，水稻年产量却占世界年总产量的 30%[1-2]。鉴于水稻土在中国非常重要，从 20 世纪 30 年代开始国内学者们对水稻土进行了较为系统的研究[3-5]。这些研究几乎全部在现代水稻土中进行，有关古水稻土的研究仅零星涉及[6]。为探明人类活动对水稻土可持续利用的影响及水稻土肥力的演变规律，古水稻土的研究已引起土壤学界的广泛关注。中国水稻栽培历史达 7 000 年以上，已发现多个 5 000 年以上的古水稻遗址，绝大部分分布在长江中下游地区[1]。据考证，位于长江三角洲的昆山市正仪镇绰墩古水稻土遗址的地下有两个古水稻土层，历史耕作时间分别距今约 3 320 年和 6 280 年[7]。在国家自然科学基金的支持下，2003 年 11 月中国科学院南京土壤研究所与苏州博物馆等单位合作，对绰墩遗址进行了土壤学的深入研究，通过对古今水稻土的肥力、环境和健康质量的比较，以孢粉学、微生物学、分子生物学和核磁共振等手段对古水稻土的性质以及可能反映的古气候、古环境条件进行了探讨[6-12]。

水稻土黏土矿物包括次生层状硅酸盐矿物和氧化物，在水稻土形成过程中，深受水耕复种、水旱轮作及施肥等耕作措施的影响。尤以耕层的理化性质及矿物成化变化最为明显[3, 13-14]，此外，由于某些物质，特别是亚铁和亚锰随渗漏水向下移动，至一定深度氧化淀积，而重新分布于土壤剖面[15-16]。因此，研究水稻土剖面内黏土矿物变化对探讨土壤发育和管理有一定的意义。

本研究以绰墩遗址古今水稻土为对象，研究和探讨古今水稻土黏土矿物特征的差异，对了解稻田土壤形成过程与人为作用强度具有一定的科学意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

绰墩山遗址位于江苏昆山正仪镇以北约 2 km，地处阳澄湖和傀儡湖之间的狭长地带，总面积约 4 m × 106 m[17]。1998—2003 年，南京博物院、苏州博物馆、昆山文物管理所及中国科学院南京土壤研究所等多家单位合作，先后在此进行了 6 次发掘，并在第 6 次发掘（2003 年 11 月）中，发现了马家浜文化水稻田[18]。

本研究综合考古以及植硅体等数据，选取了第 6 次发掘中采得的两个相邻考古剖面（图 1）的部分层次。选取土壤的基本理化性质如表 1 所示。其中土样 1 和土样 9 均为现代水稻土层（宋朝以来），土样 2 和土样 10 则为距今约 3 320 年的古水稻土层，土样 3 为

①基金项目：中德科学基金项目(No.GZ518)资助。

* 通讯作者（lzyang@issas.ac.cn）

作者简介：程月琴(1981—)，女，江苏响水人，博士研究生，主要研究方向为生态系统养分循环。E-mail:yukincheng@163.com



图 1 绰墩遗址水稻土剖面（左：P01，右：P03）

Fig. 1 Soil profiles at Chuodun (left: P01, right: P03)

表 1 供试水稻土基本理化性质

Table 1 Basic physico-chemical properties of the selected paddy soils

剖面	编号	土样	深度 (cm)	稻植硅体 (个/g 土)	pH	有机质 (g/kg)	黏粒含量 <2 μm（g/kg）	CEC (cmol/kg)
P01	1	现代表层	0 ~ 15	19 476	5.24	20.52	135	19.13
	2	古水稻土(3 ka BP)	42 ~ 57	25 271	5.37	9.75	122	17.51
	3	古水稻土（6 ka BP）	100 ~ 116	105 159	5.85	22.31	119	28.21
	4		116 ~ 130	64 007	5.90	18.26	150	24.00
	5		130 ~ 150	17 327	5.86	19.68	112	18.92
	6		150 ~ 160	19 678	5.75	17.20	121	20.86
	7		160 ~ 174	0	5.71	10.70	151	16.11
	8	母质	174 ~ 200	0	5.35	4.00	172	24.11
P03	9	现代表层	0 ~ 13	15 425	4.94	23.53	129	18.38
	10	古水稻土（3 ka BP）	50 ~ 60	15 306	6.17	10.11	155	18.70
	11	古非水稻土（6 ka BP）	88 ~ 103	0	5.97	13.98	179	26.48
	12		103 ~ 130	0	5.85	3.53	124	14.05
	13		130 ~ 155	0	5.75	3.30	185	14.27
	14		155 ~ 180	0	6.01	3.30	183	18.05
	15	母质	180 ~ 200	0	5.93	4.17	211	25.30

距今约 6 280 年的古水稻土层，土样 11 则为距今约 6 280 年却未种植过水稻的土层，土样 8 和土样 15 均是母质层。

1.2 分析方法

有关土壤基本性质测定均按常规方法进行[19]。但黏粒含量用激光颗粒分析仪测定[15]。

铁锰氧化物含量的测定：全量用 HF-$HClO_4$-HNO_3 酸溶法，游离态用 DCB（即连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠）法提取，无定形态用草酸铵-草酸缓冲液提取，络合态用焦磷酸钠溶液提取[19]，提取液中的 Fe 均用 ICP 测定。

土壤黏土矿物鉴定按李学垣[20]描述的方法进行：土壤经充分分散后用自由沉降法提取＜2 μm 黏粒；称取 50 mg 黏粒，用 DCB 法（同上）去除游离氧化铁，再用 Mg^{2+} 饱和，10% 的甘油水溶液处理后置于玻璃片上制成定向薄膜，待干后在 X'TRA 型 X 射线衍射仪上进行 X 射线分析，CuKa 辐射，管压 40 kV，管流 50 mA，2θ：3°～135°。

2　结果与讨论

2.1　铁锰氧化物含量分布

由表 2 可看出，从现代水稻土到 3 000 年前的古水稻土以及 6 000 年前的古水稻土和古非水稻土两个连续的土壤剖面中，土壤全 Fe 量的变化趋势是：①现代水稻土和古水稻土与古非水稻土和母质相比较，水稻中的全 Fe 含量明显低于非水稻土及母质，说明水田土壤中存在 Fe 的淋失。②现代水稻土与古水稻土全 Fe 量的变化在 42 ~ 48 g/kg 之间，其值变化不大，说明古今水稻耕作方式及强度对 Fe 淋失的影响效果相近。P01 剖面的 160 ~ 174 cm 土层中游离铁锰氧化物仅为 4.54 g/kg、0.543 g/kg，无定形铁锰氧化物仅达 0.79 g/kg、0.135 g/kg，络合态铁锰氧化物则为 0.14 g/kg、0.047 g/kg（表 2、表 3）；该层土壤各种形态铁锰氧化物的含量显著低于其上下两层，且与 P03 剖面中同深度的 155 ~ 180 cm 土层相比，含量也明显较低（表 2、表 3）。这说明 P01 剖面的 160 ~ 174 cm 土层中铁锰氧化物大量淋失。同时，植硅体的数据（表 1）显示，P01 剖面该层以上至 6 000 年前古水稻土层都有水稻种植的痕迹（稻植硅体数＞5 000 个/g 土[21]），因而造成这种情况的原因可能是种稻引起的铁锰还原淋溶。而 6 000 年前未种稻的 P03 剖面中却没有这种情况，更加证实了这一论点。

2.2　土壤黏粒矿物组成

两个现代水稻土表层黏粒的 X-射线衍射图谱（图 2）来看，两个剖面表层的黏粒矿物组成极相似，都是以水云母（1.00 nm）和蒙皂石（1.82 nm）为主，并伴有较多的蛭石、绿泥石（1.41 nm）和少量高岭石（0.71 nm）；而 3 000 年前和 6 000 年前的古水稻土表层黏粒矿物组成虽然也是以水云母和蒙皂石为主，但是其中蛭石、绿泥石衍射峰（1.41 nm）的强度明显低于现代水稻土（图 2），表明现代水稻土中含有较多的蛭石、绿泥石。已有报道资料[14]表明，蛭石是云母和水云母等 2:1 型层状硅酸盐矿物经过脱钾作用，减低层间电荷形成的。在现代水稻土中，由于作物产量的不断提高，作物对 K 的需要量不断地增加，当施入 K 肥不足时，植物即直接利用矿物中的 K，特别是水云母中的 K 较多被植物所吸收。在 3 000 和 6 000 多年前的耕作比较粗放，作物的产量也比较低，K 肥的来源比较丰富，因而这两个年代古水稻土表层的 1.41 nm 的衍射峰的强度变化不大。卢佳等[6]对所研究的古水稻土全 K 和有效 K 含量测定的结果也证实，现代表层水稻土低于古水稻土。

表 2　供试水稻土剖面不同形态 Fe 的含量分布（Fe_2O_3，g/kg）

Table 2　Content distributions of iron oxides in the selected paddy profiles

剖面	土样	全 Fe	游离 Fe	无定形 Fe	络合态 Fe	晶质 Fe	游离度	活化度	晶胶率
		Fet	Fed	Feo	Fep	Fed-Feo	Fed/Fet × 100	Feo/Fed × 100	(Fed-Feo)/Fed × 100
P01	现代表层	46.25	18.91	9.36	1.53	9.55	40.89	49.52	50.48
	古水稻土（3 ka BP）	42.27	11.88	6.94	1.35	4.93	28.10	58.47	41.53
	古水稻土（6 ka BP）	48.50	19.17	9.78	0.91	9.39	39.54	51.00	49.00
	116 ~ 130	47.70	17.19	7.51	0.72	9.67	36.26	43.72	56.28
	130 ~ 150	35.27	13.37	4.07	0.41	9.30	37.91	30.47	69.53
	150 ~ 160	39.88	12.20	4.80	0.37	7.41	30.60	39.30	60.70
	160 ~ 174	34.16	4.54	0.79	0.14	3.75	13.28	17.41	82.59
	母质	63.79	28.05	4.83	0.25	23.22	43.97	17.21	82.79
P03	现代表层	47.63	17.44	10.09	1.57	7.36	36.62	57.83	42.17
	古水稻土（3 ka BP）	44.80	11.63	5.73	0.45	5.89	25.95	49.30	50.70
	古非水稻土（6 ka BP）	53.26	16.79	7.26	0.79	9.53	31.53	43.23	56.77
	103 ~ 130	50.25	13.58	3.60	0.48	9.98	27.03	26.50	73.50
	130 ~ 155	30.04	11.63	2.07	0.18	9.56	38.73	17.79	82.21
	155 ~ 180	51.79	22.75	2.58	0.20	20.16	43.92	11.35	88.65
	母质	62.09	21.30	2.82	0.14	18.48	34.31	13.24	86.76

表 3 供试水稻土剖面不同形态 Mn 的含量分布（MnO_2，g/kg）

Table 3 Content distributions of manganese oxides in the selected paddy profiles

剖面	土样	全 Mn	游离 Mn	无定形 Mn	络合态 Mn
		Mnt	Mnd	Mno	Mnp
P01	现代表层	1.122	0.908	0.709	0.130
	古水稻土（3 ka BP）	0.903	0.525	0.551	0.046
	古水稻土（6 ka BP）	2.462	2.220	2.478	0.087
	116 ~ 130	1.289	0.869	0.753	0.071
	130 ~ 150	0.658	0.358	0.257	0.052
	150 ~ 160	0.740	0.349	0.298	0.050
	160 ~ 174	0.543	0.135	0.132	0.047
	母质	1.541	1.127	1.069	0.117
P03	现代表层	1.048	0.676	0.574	0.147
	古水稻土（3 ka BP）	0.867	0.456	0.448	0.027
	古非水稻土（6 ka BP）	1.740	1.367	1.476	0.041
	103 ~ 130	1.646	1.271	1.456	0.037
	130 ~ 155	0.899	0.550	0.708	0.066
	155 ~ 180	1.950	1.486	1.385	0.103
	母质	1.583	0.956	1.156	0.136

古水稻土表层（6 ka BP，100 ~ 116 cm）和古非水稻土表层（6 ka BP，88 ~ 103 cm）黏粒的衍射图谱较相似，都是以水云母和蒙皂石为主，伴有少量的蛭石、绿泥石和高岭石；其中蒙皂石（1.82 nm）的衍射峰的强度在种稻后不但没有增强，反而降低，这证明水田土壤有利于蒙皂石的形成理论[1]并不可靠。这反而说明水田土壤由于长期受水的侵蚀，使土壤中颗粒极细微的蒙皂石类矿物随水流失，古水稻土表层黏粒淋失（表 1）证实了此观点。

两个土壤剖面母质层黏粒的 X 射线衍射图谱极相似，其黏粒矿物组成都是以水云母为主，伴有少量蛭石、绿泥石和高岭石，还有结晶较差的、含量较少的蒙皂石。但是随着成土过程的进行，土壤中蒙皂石的结晶变好，含量也增加；而高岭石的含量变化不大，其含量也很少。表明现代土壤和古土壤中黏土矿物的演变规律相似，为水云母→蛭石、绿泥石→蒙皂石。这证明在 3 000 多年前和 6 000 多年前的气候条件与当地现代的气候条件基本相似，都是极温湿的气候条件。

2.3 古今水稻耕作的探讨

与 6 000 年前古非水稻土相比，6 000 年前古水稻土剖面出现 Fe、Mn 的大量淋失，颗粒极细微的蒙皂石类矿物随水流失，均说明 6 000 年前的耕作活动已对水稻土剖面产生影响。据考证[12,22]，6 000 年前的古水稻土和古非水稻土均处于新石器时代的马家浜时期，人们的耕作工具甚为简陋，耕作强度较低。在耕作强度较低的情况下，只有通过长期的耕作才能使剖面出现黏粒向下淋洗，Fe、Mn 大量淋失，蒙皂石类矿物随水流失的现象。同时，6 000 年前古水稻土耕层有机质含量明显高于对应的非水稻土。说明，原始的耕作方式虽然简陋，但是长期的耕作已能使土壤剖面发生明显的变化，即表层积累有机质，剖面出现黏粒，Fe、Mn 以及蒙皂石类矿物的淋失。

与古水稻土相比，现代水稻土全 K 和速效 K 含量低[6]，1.41 nm 的蛭石、绿泥石衍射强度高。这是因为，在现代水稻种植过程中，为了提高作物产量，N、P 等化肥被大量施用，而 K 肥往往被忽略，作物对 K 的需要量不断地增加，当施入 K 肥不足时，植物即直接利用矿物中的 K，特别是水云母中的 K 较多被植物所吸收；而 3 000 和 6 000 多年前的耕作比较粗放，作物的产量也比较低，K 肥的来源比较丰富。因此，在现代水稻种植过程中，应注重 K 肥的补充。

3 结论

（1）古今水稻土全 Fe 含量的差异较小。与 6 000 年前的古非水稻土相比，6 000 年前古水稻土剖面出现 Fe、Mn 和蒙皂石类矿物随水流失的现象。

（2）古今水稻土黏土矿物组成都是以水云母和蒙皂石为主，但是古水稻土 1.41 nm 的蛭石和绿泥石含

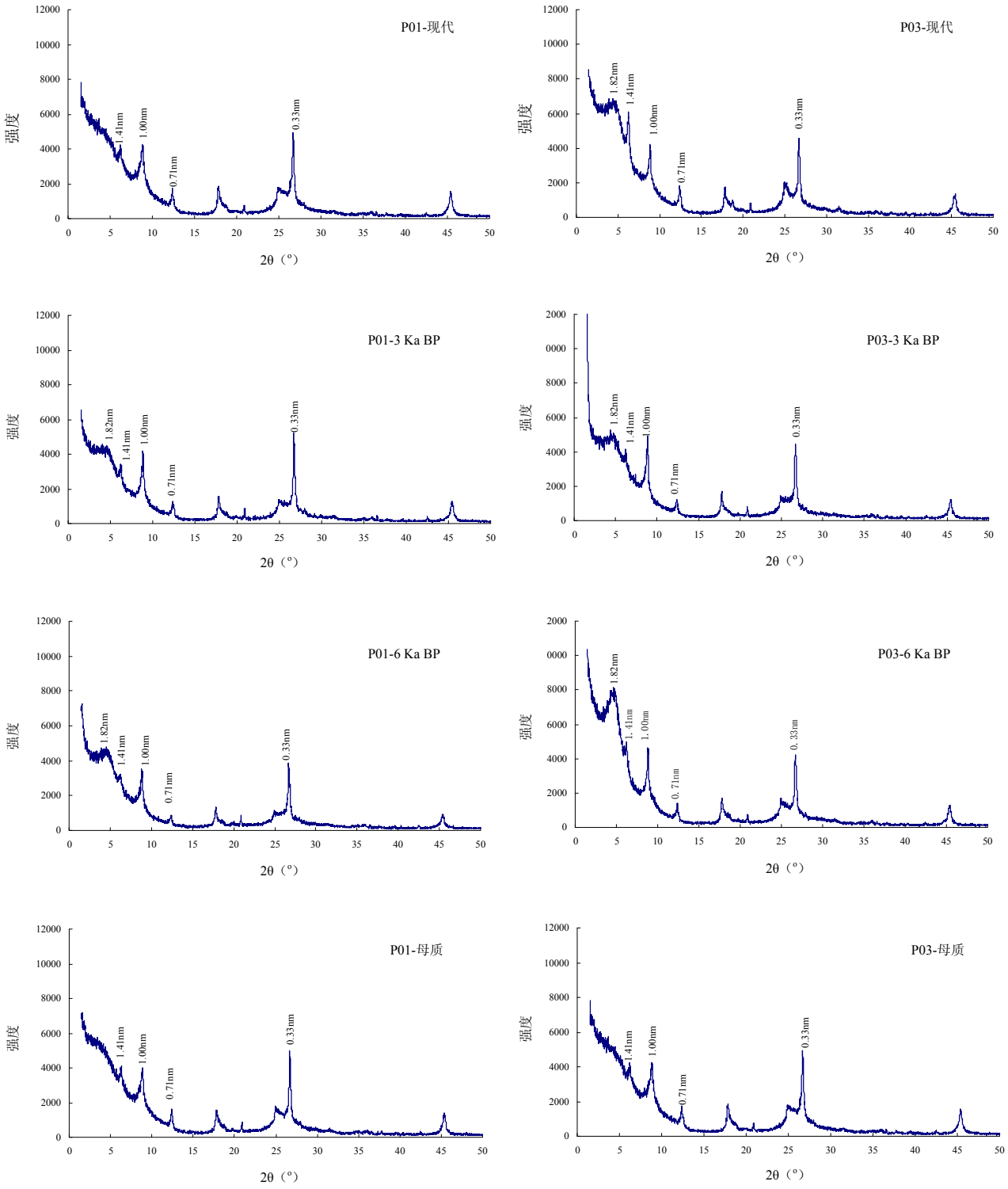


图 2　供试水稻土 X 射线衍射图

Fig. 2　X-ray diffractograms of selected paddy soils

量明显低于现代水稻土。现代土壤和古土壤中黏土矿物的演变规律相似，为水云母→蛭石、绿泥石→蒙皂石。

致谢：感谢南京土壤研究所杨德涌老师在文章撰写过程中给予的指导和帮助。

参考文献：

[1]　卢佳, 胡正义, 曹志洪, 杨林章, 林先贵, 董元华, 丁金龙, 郑云飞. 长江三角洲绰墩遗址埋藏古水稻土肥力特征研究. 中国农业科学, 2006, 39(1): 109−117

[2] Kögel-Knabner I, Amelung W, Cao ZH, Fiedler S, Frenzel P, Jahn R, Kalbitz K, Kölbl A, Schloter M. Biogeochemistry of paddy soils. Geoderma, 2010, 157(1/2): 1−14

[3] 李庆逵. 中国水稻土. 北京: 科学出版社, 1992: 1−545

[4] 徐琪, 陆彦椿, 朱洪官. 中国太湖地区水稻土. 上海: 上海科学技术出版社, 1980: 1−98

[5] Gong ZT. Origin, evolution and classification of paddy soils in China. Advance in Soil Science, 1986, 5: 174−200

[6] 龚子同, 刘良梧, 张甘霖. 苏南昆山地区全新世土壤与环境. 土壤学报, 2002, 39: 618−626

[7] 胡君利, 林先贵, 褚海燕, 尹睿, 张华勇, 曹志洪, 胡正义. 古水稻土与现代水稻土硝化活性的比较. 土壤学报, 2005, 42(6): 1 044−1 046

[8] 曹志洪, 杨林章, 林先贵, 胡正义, 董元华, 章钢娅, 陆彦椿, 尹睿, 吴艳宏, 丁金龙, 郑云飞. 绰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. 土壤学报, 2009, 9(44): 838−847

[9] Cao ZH, Ding JL, Hu ZY, Knicker H, Kögel-Knabner I, Yang LZ, Yin R, Lin XG, Dong YH. Ancient paddy soils from the Neolithic age in Yangtze River Delta. Naturwissenschaften, 2006, 93: 232−236

[10] 李春海, 章钢娅, 杨林章, 林先贵, 胡正义, 董元华, 曹志洪, 郑云飞, 丁金龙. 绰墩遗址古水稻土孢粉学特征的初步研究. 土壤学报, 2006, 43(3): 452−460

[11] 李久海, 董元华, 曹志洪, 王辉, 安琼, 胡正义, 杨林章, 林先贵, 尹睿. 6000 年以来水稻土中多环芳烃的分布特征及其来源判断. 环境科学, 2006, 27(6): 1 235−1 239

[12] 曹志洪. 中国史前灌溉稻田和古水稻土研究进展. 土壤学报, 2008, 9(45): 784−791

[13] 张效年. 中国水稻土的黏土矿物. 土壤学报, 1961, 9(3/4): 81−102

[14] 谢建昌, 周健民. 钾与中国农业. 南京: 河海大学出版社, 2000: 57−65

[15] Cheng YQ, Yang LZ, Cao ZH, Ci E, Yin SX. Chronosequential changes of selected pedogenic properties in paddy soils as compared with non-paddy soils. Geoderma, 2009, 151: 31−41

[16] Zhang GL, Gong ZT. Geochemical features of element migration under artificial submergence. Acta Paedologica Sinica, 1993, 30: 355−365

[17] 苏州博物馆. 江苏昆山绰墩山遗址第一至第五次发掘简报. 东南文化, 2003(1): 1−42

[18] 汤陵华. 绰墩山遗址的原始稻作遗址. 东南文化, 2003(增刊 1): 6−49

[19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000

[20] 李学垣. 土壤化学及实验指导. 北京: 中国农业出版社, 1997: 29−235

[21] Hiroshi FJ. Fundamental studies in plant opal analysis: On the silica bodies of motor cell of rice plants and their relatives and method of quantitative analysis. Journal of Japanese Archaeology Society, 1976(9): 55−56

[22] 游修龄. 中国稻作史. 北京: 中国农业出版社, 1995: 204−205

Clay Mineral Characteristics of Ancient Paddy at Chuodun Site in Yangtze River Delta

CHENG Yue-qin[1,2], YANG Lin-zhang[1], CAO Zhi-hong[1]

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008, *China*; 2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Two layers of ancient paddy soil and one modern paddy soil were discovered in archeological excavation of Chuodunshan Relics in Kunshan, China. One of the ancient paddy soils could be ascended to 6 ka BP (prehistoric) and the other to 3 ka BP (Shang-Zhou Period). Two soil profiles, not far apart, named P01 (containing both ancient paddy soil layers and the modern paddy soil layer) and P03 (containing only the latter ancient paddy soil layer and the modern paddy soil layers) respectively, were fixed and soil samples were collected according to soil color and texture. In order to compare the difference of clay mineral characteristics between ancient paddy soils and modern paddy soil, the contents of iron oxides and manganese oxides and the constituents of clay mineral were analyzed. The results showed that there was no difference in total iron content between ancient paddy soils and modern paddy soils. Compared to ancient non-paddy soil (6 ka BP), some of the iron oxides, manganese oxides and smectite were lost in the profile of ancient paddy soil (6 ka BP). The mineral constituents in ancient paddy soil and present paddy soil were very similar, but the contents of 1.4 nm mineral in ancient paddy soil was lower than that of modern paddy soil. The evolution of clay minerals were similar between modern and ancient paddy soils: both were from hydromuscovite to chlorite and vermiculite and then to smectite.

Key words: Chuodun Site, Ancient paddy soil, Clay mineral, Iron oxides and manganese oxides, Caracteristics