

太湖地区水耕人为土中漂白层的成因探讨*

王培燕¹ 黄标^{2†} 王虹² 潘剑君^{1†}

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要 采集太湖地区 4 个具有漂白层的水耕人为土剖面(E-A1、E-A2、E-A3、E-A4)及 1 个发育于相同母质上的一般水耕人为土剖面作为参照(Ref), 描述了土壤剖面的形态特征, 分析了土壤颗粒组成、黏粒矿物组成、铁氧化物以及大量和微量元素等, 并探讨了漂白层成因。5 个剖面土壤颗粒组成以粉粒为主, 在 60%~75% 之间, 且剖面中各层次变异系数较小, 小于 10%; 大量元素和微量元素在剖面各层次间变异系数也小于 10%, 指示漂白层与上覆和下伏土层发育在相似物质来源的土壤母质上; 而 E-A1 剖面漂白层中较高的粉粒含量(75.04%)、较大的中细粉粒和中细粉粒/粗粉粒比值的变异系数(38.05%、61.85%)表明该剖面母质具有不均一性。说明 E-A2、E-A3、E-A4、Ref 剖面土壤性质的变化主要是由于成土作用形成的, 而 E-A1 剖面土壤的性质变化除受成土作用影响外, 还受沉积环境的影响。E-A2、E-A3、E-A4 剖面的漂白层中蒙脱石和蛭石、粉粒和粗粉粒、SiO₂、CaO、Zr 等含量高于上下土层, 而水云母和绿泥石、游离铁、Al₂O₃、Rb、Li、Ba、稀土元素(Rare earth element, REE)等则相反; 同时, 参照剖面亦有与 E-A2、E-A3、E-A4 剖面类似的特点, 只是漂白作用出现在耕作层, 不能定义为漂白层; 而 E-A1 剖面的部分性质则显示出空间上的不一致性, 其粉粒含量并非漂白层最高, 而是随剖面土层深度向下越来越大。这些变异表明, 太湖地区水耕人为土漂白层的形成, 可以由黄土性泻湖相沉积物经过水耕过程中水分的周期性淹水和排干, 通过机械淋洗和活性铁的淋溶而形成(剖面 E-A2、E-A3、E-A4), 也可以是母质沉积的过程中受湖水水面升降, 导致机械淋溶, 然后水耕过程叠加活性铁的淋溶而形成(剖面 E-A1)。

关键词 漂白层; 母质; 机械淋洗; 铁的淋溶; 同源性

中图分类号 S151+.3 **文献标识码** A

在长江中下游地区的一些水耕人为土剖面中, 经常可看到颜色较浅的土层, 即水耕氧化还原层中有一呈灰色或灰白、浅白色的土层分布^[1-3], 在系统分类中将该土层作为一个诊断表下层, 即“漂白层”^[4]。具有该构型的水耕人为土就是人们常说的“白土”^[1-3]。该土壤肥力较低, 有机质、氮、磷、钾缺乏, 是太湖流域的一类低产土壤^[5]。由于特殊的形态特征, 其发生曾引起国内外土壤工作者的广泛注意^[6-11]。现有的研究结果中, 漂白层的成因说法各异, 有研究认为漂白层是地质沉积作用形成的^[7, 12], 也有研究认为是植稻灌溉过程中黏粒和铁淋溶的产物^[9, 11]。但是近几十年来, 关于这方面的研究已很少, 鉴于水耕人为土形成条件的复杂性, 漂白层的成因仍然是值得研究的课题。

本研究选择太湖地区具有代表性的“白土”作为研究对象, 系统采集了具有漂白层的不同类型水耕人为土剖面, 通过对其形态特征、颗粒组成、黏粒矿物、铁氧化物、大量元素和微量元素等方面特征的观察和分析, 阐明其土壤学和地球化学特征, 并探讨漂白层的成因, 以期对该土壤的系统分类和改良利用等提供一定指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太湖地区大部分属北亚热带气候, 仅南部小部分属中亚热带。年均温 14~18℃, 年降水量 1 000~1 400 mm, 集中于春、夏两季。地势低平, 土壤母质

* 国家科技基础性工作专项(2008FY110600)和中国科学院战略先导科技专项子课题(XDA05050503)资助

† 通讯作者, E-mail: bhuang@issas.ac.cn, jpan@njau.edu.cn

作者简介: 王培燕(1988—), 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤系统分类研究。E-mail: 2011103106@njau.edu.cn

收稿日期: 2013-05-13; 收到修改稿日期: 2013-09-26

多为湖相沉积物、黄土性的泻湖相沉积物以及长江冲积物等。农业生产一年二熟,主要为稻麦轮作或稻油轮作。

1.2 研究材料

本研究系统观察了具有漂白层的不同类型水耕人为土剖面(表 1),剖面点分别设置在距太湖几千米的吴江市和常州武进区的(海拔 2 ~ 5 m)以及距太湖

四五十千米的张家港市(海拔 5 ~ 20 m)。它们均发育于黄土性泻湖相沉积物母质上,土壤剖面中的漂白层具有不同厚度、出现在不同深度。按土壤系统分类^[4],这些土壤剖面分属潜育(E-A1)、简育(E-A2)、铁聚(E-A3)、铁渗(E-A4)水耕人为土土类。同时还采集发育于相同母质上不具有漂白层的水耕人为土,即普通铁聚水耕人为土作为参照(Ref)。

表 1 土壤采样点信息及土壤类型

Table 1 General information and soil type of the soil profiles investigated

剖面编号 Profile No.	土壤类型 Soil taxonomy	采样地点 Sampling site	经纬度 Latitude and longitude	海拔 Altitude (m)
E-A1	铁聚潜育水耕人为土 Fe-accumulic Gleyi-Stagnic Anthrosols	吴江市震泽镇角浜 Jiaobang, Zhenze Town, Wujiang	E120°29'20"; N30°54'50"	2 ~ 5
E-A2	漂白简育水耕人为土 Albic Hapli-Stagnic Anthrosols	张家港市妙桥镇吹鼓村 Chuigu, Miaoqiao Town, Zhangjiagang	E120°41'35"; N31°47'4"	5 ~ 20
E-A3	普通铁聚水耕人为土 Typic Fe-accumuli-Stagnic Anthrosols	张家港市妙桥镇杏氏村 Xingshi, Miaoqiao Town, Zhangjiagang	E 120°40'53"; N 31°45'0"	5 ~ 20
E-A4	漂白铁渗水耕人为土 Albic Fe-leachi-Stagnic Anthrosols	常州武进前黄水稻研究所 Qianhuang Town, Wujin, Changzhou	E119°59'57"; N 31°33'56"	2 ~ 5
Ref	普通铁聚水耕人为土 Typic Fe-accumuli-Stagnic Anthrosols	张家港市凤凰镇双塘村 Shuangtang, Fenghuang Town, Zhangjiagang	E120°38'59"; N31°46'55"	5 ~ 20

1.3 土壤的观察、采样、分析

选择面积较大的田块挖掘土壤剖面,深度 1.0 ~ 1.1 m。土壤形态描述参照 FAO^[13] 观察、描述、记录,土壤颜色确定根据《中国标准土壤色卡》^[14]。确定了土壤发生层次后,按发生层采集土样^[15],总计 5 个土壤剖面,24 个土壤样品。土壤样品在室内自然风干后,挑出枯枝落叶、根系,四分法取土,分别过 10 目、60 目、100 目、200 目的尼龙筛,供分析之用。在进行土壤颗粒组成分析过程中,提取了 < 0.002 μm 粒径的土壤胶体,供黏粒矿物鉴定和定量。

土壤样品的分析包括:颗粒组成(10 目土壤,沉降法测定)^[16];全铁(100 目土壤,氢氟酸-高氯酸酸溶,比色法测定)^[17];游离铁(60 目土壤,柠檬酸钠-碳酸氢钠-连二亚硫酸钠浸提,比色法测定)^[18];活性铁(60 目土壤, pH = 3.0 的酸性草酸铵浸提,黑暗条件下震荡 4 h,比色法测定)^[19];黏粒矿物(土壤胶体;X 射线衍射分析法测定)^[17];大量元素(200 目土壤,X 射线荧光光谱仪法测定)^[20];微量元素与稀土元素(200 目土壤,电感耦合等离子体质谱法测定)^[20]。

1.4 数据处理

利用 SPSS(19.0) 统计软件对大量元素、微量元素进行样品和变量的聚类分析;用 SigmaPlot 绘图软件对土壤颗粒组成、稀土元素等在剖面内的变化图进行绘制。

2 结果

2.1 土壤的形态特征及黏粒矿物组成

从土壤剖面形态特征看(图 1,表 2),各剖面漂白层均由 ≥ 85% (按体积计) 的漂白物质构成,润态颜色中彩度均 ≤ 2,明度 ≥ 3,厚度达 15 ~ 30 cm,其中张家港的 E-A2 剖面漂白层最厚(30 cm),张家港 E-A3 剖面 and 吴江剖面(E-A1) 较薄(15 cm)。E-A2 和武进剖面(E-A4) 的漂白层出现较浅,且在耕作层和犁底层之下,E-A1 和 E-A3 剖面漂白层出现较深,45 cm 以下,不与耕作层和犁底层毗邻。参照(Ref) 剖面中无漂白层存在,但在耕作层之下的犁底层(15 ~ 30 cm) 颜色较浅(图 1)。所有剖面各发生层次间均为渐变过渡关系。

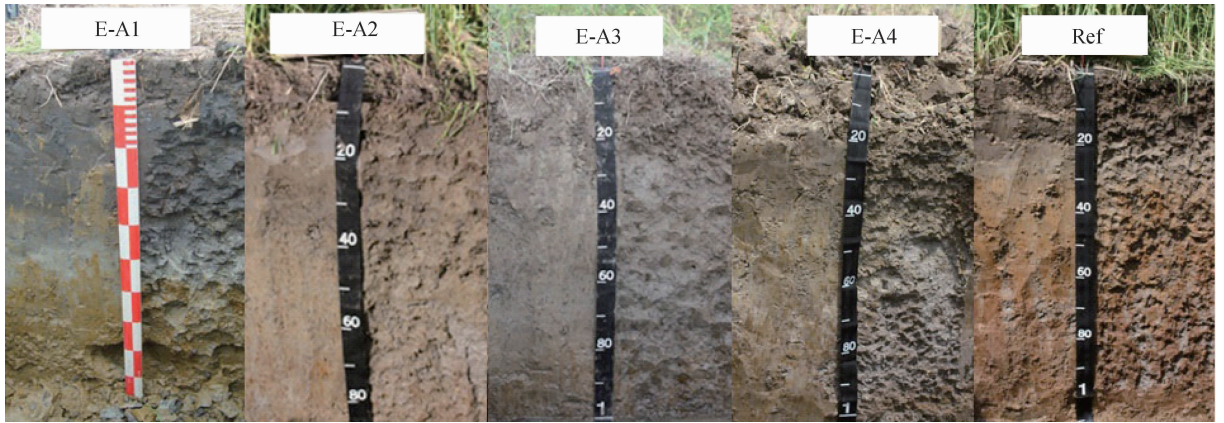


图 1 采集剖面照片

Fig. 1 The photos of observed and described soil profiles

表 2 土壤剖面形态特征及黏粒矿物组成

Table 2 Morphological characteristics and composition of clay minerals of the clay fraction in the studied soil profiles

剖面编号 Profile No.	层次 Layer	深度 Depth (cm)	颜色(润态) Color (Moisture state)	质地 Texture	结构 Structure	黏粒矿物组成 Clay mineral composition (%)					
						蒙脱石 Smectite	蛭石 Vermiculite	绿泥石 Chlorite	水云母 Hydromica	高岭石 Kaolinite	石英 Quartz
E-A1	Ap1	0 ~ 9	10YR4/2	粉砂壤土 ^①	团粒状 ^③	27	23	11	18	18	4
	Ap2	9 ~ 16	10YR4/1	粉砂壤土 ^①	块状 ^④	28	17	15	20	20	4
	Br	16 ~ 45	2.5Y4/2	粉砂壤土 ^①	团块状 ^⑤	29	16	13	21	21	5
	E	45 ~ 60	2.5Y7/1	粉砂壤土 ^①	团块状 ^⑤	25	26	10	16	16	5
	BE	60 ~ 100	2.5Y5/4	粉砂壤土 ^①	块状 ^④	34	21	10	15	15	4
E-A2	Ap1	0 ~ 15	5YR3/1	粉砂壤土 ^①	团粒状 ^③	11	17	15	27	27	7
	Ap2	15 ~ 35	5YR2/2	粉砂壤土 ^①	块状 ^④	12	26	21	18	18	5
	E	35 ~ 65	10YR5/1	粉砂壤土 ^①	块状 ^④	22	24	16	15	15	6
	BE	65 ~ 100	10YR4/2	粉砂壤土 ^①	块状 ^④	11	30	17	15	15	5
E-A3	Ap1	0 ~ 20	5YR3/1	粉砂壤土 ^①	团粒状 ^③	12	28	20	19	19	5
	Ap2	20 ~ 35	5YR3/2	粉砂壤土 ^①	块状 ^④	9	28	24	18	18	7
	BE	35 ~ 60	5YR4/1	粉砂壤土 ^①	块状 ^④	19	32	13	11	11	5
	E	60 ~ 75	10YR5/1	粉砂壤土 ^①	块状 ^④	7	28	22	18	18	5
	Br	75 ~ 100	10YR4/4	粉砂壤土 ^①	块状 ^④	9	20	17	29	29	7
E-A4	Ap1	0 ~ 16	10YR4/2	粉砂质黏壤土 ^②	团粒状 ^③	15	23	18	16	16	5
	Ap2	16 ~ 29	2.5Y4/2	粉砂质黏壤土 ^②	团块状 ^⑤	27	24	11	14	14	5
	E	29 ~ 46	2.5Y5/1	粉砂壤土 ^①	块状 ^④	35	26	11	11	11	3
	BE	46 ~ 63	10YR5/1	粉砂壤土 ^①	棱柱状 ^⑥	28	26	9	15	15	5
	Br1	63 ~ 92	10YR4/1	粉砂质黏壤土 ^②	块状 ^④	25	24	12	18	18	5
	Br2	92 ~ 110	10YR4/2	粉砂壤土 ^①	块状 ^④	26	26	10	12	12	5
Ref	Ap1	0 ~ 15	2.5Y4/2	粉砂壤土 ^①	团粒状 ^③	8	21	26	19	19	5
	Ap2	15 ~ 30	2.5Y5/2	粉砂壤土 ^①	块状 ^④	9	26	20	16	16	6
	Br1	30 ~ 60	10YR4/6	粉砂壤土 ^①	块状 ^④	—	26	22	26	26	7
	Br2	60 ~ 100	7.5YR4/4	粉砂壤土 ^①	块状 ^④	6	29	20	23	23	5

①Silt loam, ②Silty clay loam, ③Granular, ④Blocky, ⑤Crumb, ⑥Prismatic

5 个剖面黏粒矿物类型主要有蒙脱石、蛭石、绿泥石、水云母和高岭石,还含有少量的石英(表 2)。从整个剖面的黏粒矿物来看,出现在太湖边缘的土壤剖面(E-A1 和 E-A4 剖面),蒙脱石含量相对较高(25%~35%),而绿泥石相对较低(9%~18%),远离太湖的几个土壤剖面(E-A2, E-A3 和 Ref 剖面)则相反,两者含量分别为 0%~22% 和 15%~26%,其中同一地区无漂白层的剖面(Ref)中蒙脱石含量更低(0~9%)。其余矿物在土壤剖面间差异不是特别明显。漂白层土壤黏粒矿物,除了 E-A1、E-A3 剖面外,蒙脱石和蛭石含量之和一般均高于上下土层,而绿泥石、水云母和高岭石均要低于其余土层,如果将 B 层与漂白层(E)的过渡层(BE)考虑在内,则上述规律更加明显,且 E-A1、E-A3 剖面也有相同规律。

2.2 土壤的颗粒组成

供试剖面的土壤质地属砂壤土或黏壤土(表 1),土壤颗粒组成(Particle size distribution, PSD)以

粉粒为主,黏粒次之,砂粒含量最少(图 2)。整个剖面土壤的加权平均粉粒含量,在有漂白层存在的水耕人为土中(E-A1, 75.04%; E-A2, 67.50%; E-A3, 62.23%; E-A4, 61.47%),大于没有漂白层存在的普通铁聚水耕人为土(Ref, 60.90%),其中, E-A1 粉粒含量最高,黏粒含量则相反。对漂白层粉粒含量而言, E-A2、E-A3、E-A4 剖面漂白层的粉粒含量均最高,高于上下其他土层(图 2),这在 E-A4 剖面的质地类型分布也反映出来(表 2),该剖面中漂白层和过渡层为粉砂壤土,相邻的上下土层则为粉砂质黏壤土;而 E-A1 剖面中的漂白层的粉粒含量并非最高,其下部土层随着土壤深度的增加越来越高,明显区别于上述 3 个土壤剖面。剖面 E-A3、E-A4 中漂白层黏粒含量均最低,低于其上下土层,而 E-A1、E-A2 中漂白层黏粒含量并非最低,而是随土层深度的增加越来越低,这一规律在 E-A1 中表现的尤为明显(图 2)。尽管剖面中粉粒含量存在一定的变化,但变异系数并不大,均小于 10%。

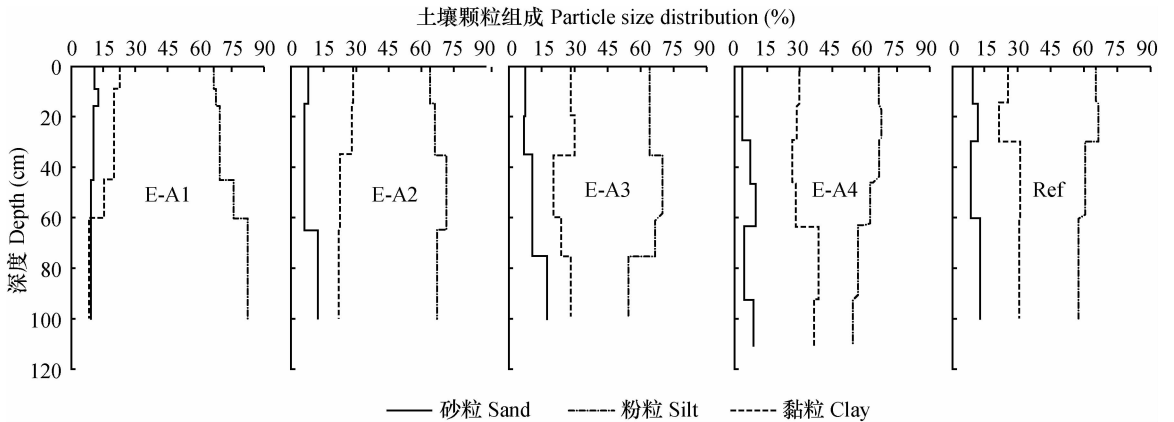


图 2 土壤黏粒($< 2 \mu\text{m}$)、粉粒($2 \sim 50 \mu\text{m}$)与砂粒($> 50 \mu\text{m}$)在剖面中的含量与分布

Fig. 2 Contents and content distributions of clay ($< 2 \mu\text{m}$), silt ($2 \sim 50 \mu\text{m}$), and sand ($> 50 \mu\text{m}$) in the studied soil profiles

为深入了解粉粒在剖面中的分布状况,研究了中细粉粒和粗粉粒含量在剖面中的分布。可看出具有漂白层的土壤剖面中, E 层或 BE 层中细粉粒含量明显较低,而粗粉粒含量相对较高,中细粉粒/粗粉粒比值这一规律则更为明显。但与整个粉粒含量不同的是,剖面 E-A1 中中细粉粒和粗粉粒变异系数较高,分别达 38.05% 和 26.63%,明显大于其他四个剖面(表 3)。

2.3 土壤铁氧化物分布特征

5 个剖面土壤氧化物及其参数均显示了较为明显的规律(表 4)。全铁(Fe_t)、游离铁(Fe_d)、活性铁(Fe_o)含量均表现为表层和底层含量较高,中间漂白层较低。作为游离铁和活性铁之差的晶质铁,5

个剖面变化范围较大($3.1 \text{ g kg}^{-1} \sim 35.1 \text{ g kg}^{-1}$),其含量除剖面 E-A1 在漂白层稍低外(7.5 g kg^{-1}),其余剖面均是随着深度的增加而增加。用晶质铁与游离铁之比表示的晶化度,其在土壤剖面中的变化规律则与晶质铁类似。用活性铁与游离铁之比表示的土壤铁活化度,变化规律与全铁、游离铁和活性铁含量一致,即漂白层的活化度在其相应剖面中相对较低,其中剖面 E-A1 的漂白层的活化度与其上覆所有土层相比,差异很大。用晶质铁与活性铁之比表示的晶胶比在 5 个剖面中均有明显的分异,漂白层大于非漂白层,其中剖面 E-A1 漂白层的晶胶比值(11.2)又大于 E-A2、E-A3、E-A4 漂白层(8.5、11.1、7.9)。

表 3 土壤剖面中不同粒级粉粒分布及比值

Table 3 Distributions and ratios of silts different in particle size in the soil profiles

剖面 编号 Profile No.	层次 Layer	粉粒含量 Content of silt(%)	粉粒组成 Silt composition(%)		中细粉粒/粗粉粒 Medium-fine silt/ Coarse silt
			中细粉粒 (2 ~ 20 μm) Medium-fine silt	粗粉粒 (20 ~ 50 μm) Coarse silt	
E-A1	Ap1	66.57	28.84	37.73	0.76
	Ap2	67.65	28.93	38.72	0.75
	Br	69.21	29.56	39.65	0.75
	E	75.90	18.75	57.15	0.33
	BE	82.15	11.96	70.18	0.17
	加权均值 ± 标准差 Mean ± SD	75.04 ± 6.59	20.79 ± 7.91	54.25 ± 14.45	0.45 ± 0.28
	变异系数 CV(%)	8.79	38.05	26.63	61.85
E-A2	Ap1	63.98	38.81	25.17	1.54
	Ap2	66.19	37.55	28.64	1.31
	E	71.24	39.82	31.42	1.27
	BE	66.55	36.07	30.49	1.18
	加权均值 ± 标准差 Mean ± SD	67.50 ± 3.05	37.90 ± 1.62	29.60 ± 2.76	1.29 ± 0.15
	变异系数 CV(%)	4.52	4.28	9.33	11.93
E-A3	Ap1	64.33	39.83	24.50	1.63
	Ap2	63.40	39.93	23.47	1.70
	BE	69.42	39.24	30.18	1.30
	E	66.39	37.02	29.37	1.26
	Br	54.17	31.63	22.54	1.40
	加权均值 ± 标准差 Mean ± SD	62.23 ± 5.73	37.23 ± 3.50	26.01 ± 3.52	1.45 ± 0.20
	变异系数 CV(%)	9.06	9.41	13.52	13.59
E-A4	Ap1	66.57	45.10	21.47	2.10
	Ap2	67.86	46.67	21.20	2.20
	E	66.22	46.72	19.50	2.40
	BE	62.44	38.62	23.82	1.62
	Br1	56.78	38.83	17.94	2.16
	Br2	54.45	38.40	16.05	2.39
	加权均值 ± 标准差 Mean ± SD	61.47 ± 5.60	41.79 ± 4.17	19.68 ± 2.76	2.15 ± 0.28
	变异系数 CV(%)	9.10	9.99	14.05	13.22
Ref	Ap1	65.18	40.67	24.51	1.66
	Ap2	66.87	37.88	28.99	1.31
	Br1	60.50	34.25	26.25	1.30
	Br2	57.36	33.19	24.17	1.37
	加权均值 ± 标准差 Mean ± SD	60.90 ± 4.35	35.33 ± 3.43	25.57 ± 2.20	1.39 ± 0.17
	变异系数 CV(%)	7.14	9.71	8.61	12.17

表 4 不同提取态铁氧化物的含量及其比例关系

Table 4 Contents and ratios of extractable Fe oxides different in form in the studied soil profiles

剖面编号 Profile No.	层次 Layer	全铁 Fe _t (g kg ⁻¹)	游离铁 Fe _d (mg kg ⁻¹)	活性铁 Fe _o (mg kg ⁻¹)	晶质铁 (Fe _d -Fe _o) (mg kg ⁻¹)	活化度 Fe _o /Fe _d (%)	晶化度 (Fe _d -Fe _o) /Fe _d (%)	晶胶比 (Fe _d -Fe _o) /Fe _o
E-A1	Ap1	39.9	13.2	8.4	4.8	63.6	36.4	0.6
	Ap2	41.0	12.2	9.1	3.1	74.3	25.7	0.3
	Br	40.4	14.9	3.3	11.6	22.2	77.8	3.5
	E	32.0	8.2	0.7	7.5	8.2	91.8	11.2
	BE	63.7	30.5	1.5	29.0	4.9	95.1	19.5
E-A2	Ap1	45.5	18.5	9.2	9.3	49.5	50.5	1.0
	Ap2	44.1	17.8	3.2	14.6	18.1	81.9	4.5
	E	34.1	13.4	1.4	12.0	10.6	89.5	8.5
	BE	29.8	14.1	2.3	11.8	16.1	83.9	5.2
E-A3	Ap1	47.6	19.1	8.6	10.5	44.9	55.1	1.2
	Ap2	47.6	19.2	2.5	16.7	12.8	87.2	6.8
	BE	34.7	13.4	1.6	11.8	12.2	87.8	7.2
	E	31.1	14.1	1.1	13.0	8.2	91.7	11.1
	Br	58.6	36.5	1.4	35.1	3.9	96.1	24.4
E-A4	Ap1	39.3	15.0	9.5	5.5	63.2	36.8	0.6
	Ap2	40.4	15.5	4.2	11.3	26.9	73.1	2.7
	E	33.2	13.1	1.5	11.6	11.3	88.7	7.9
	BE	31.3	13.9	1.6	12.3	11.5	88.5	7.7
	Br1	46.1	20.2	4.2	16.0	20.6	79.4	3.9
	Br2	50.1	22.1	6.9	15.2	31.3	68.9	2.2
Ref	Ap1	43.5	16.4	6.0	10.4	36.5	63.5	1.7
	Ap2	31.1	13.4	1.6	11.8	12.1	87.9	7.3
	Br1	48.2	23.0	2.1	20.9	9.3	90.7	9.8
	Br2	55.6	26.9	3.3	23.6	12.1	87.9	7.2

2.4 土壤元素地球化学特征

为了更清晰地了解土壤形成过程中元素的分布特征,基于土壤中大量元素含量对元素种类和土壤剖面层次进行了聚类分析(图 3),以便选择代表性元素分析元素的分布特征。就元素种类而言,如果以聚类距离 25 为界,元素可分为两组,一组包括 K₂O、MgO、Al₂O₃、Fe₂O₃、MnO、TiO₂等,另一组包括 Na₂O、SiO₂、CaO 等(图 3a),表明这两组元素在土壤中有其各自独特的活动性和分布特征。同时,对各土壤剖面层次的聚类结果显示,以聚类距离约 25 为界,土壤剖面层次也可大致分出两组,一组包括了所有漂白层及一个耕作层的层次,其为 Ref 剖面的

耕作亚表层,另一组全部为非漂白层(图 3b),可见漂白层与非漂白层间元素含量分布也有着明显的区别。仔细观察大量元素在剖面中的含量分布可看出(表 5),漂白层与非漂白层土壤相比,上述第一组元素 K₂O、MgO、Al₂O₃等元素含量相对较低,Na₂O、SiO₂、CaO 等元素含量相对较高。类似地,以第二组代表性元素 SiO₂和第一组代表性元素 Al₂O₃和 Fe₂O₃计算出的硅铝率(Sa)和硅铁铝率(Saf)值,漂白层也明显高于非漂白层。有意思的是,Sa 和 Saf 值在各土壤漂白层间非常接近,Sa 值约 13 左右,Saf 值在 8 左右(表 5)。

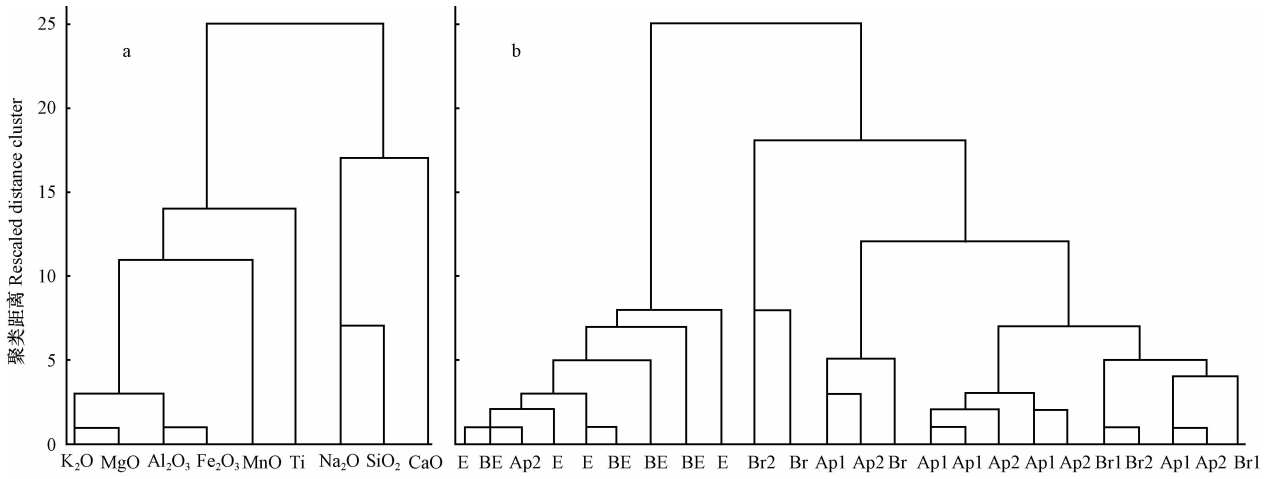


图3 土壤大量元素(a)、剖面层次(b)的聚类分析树状图

Fig. 3 Cluster analysis dendrograms of soil macro-elements (a) and soil horizons (b) in the studied soil profiles

表5 土壤剖面中大量元素和微量元素的含量

Table 5 Contents of macro and trace elements in the studied soil profiles

剖面编号 Profile No.	层次 Layer	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Sa		Ba	Be	Li	Rb	Sc	Zr	ΣREE
		(g kg ⁻¹)								Sa	Saf	(mg kg ⁻¹)					
E-A1	Ap1	17.6	10.3	14.2	7.6	709	110	7.5	10.9	6.6	427	1.87	320	774	9.0	313	192
	Ap2	17.5	10.2	14.5	7.5	716	108	7.6	11.2	6.6	430	1.88	311	786	9.4	314	186
	Br	17.3	10.0	15.1	7.1	729	106	7.6	11.6	6.9	411	1.78	312	82	9.4	325	195
	E	15.8	7.6	16.9	6.0	755	97	7.3	13.3	8.3	364	1.98	338	68	8.3	347	183
	BE	15.4	8.6	18.5	5.7	769	86	7.3	15.2	6.5	353	1.70	266	608	7.3	480	203
E-A2	Ap1	18.9	9.0	12.8	9.2	714	113	8.4	10.7	6.2	475	2.11	347	89	10.0	342	206
	Ap2	18.5	9.8	13.4	9.5	721	114	8.5	10.8	6.3	468	2.23	366	906	10.6	353	207
	E	15.9	7.8	14.7	7.2	766	99	8.3	13.1	8.0	420	1.82	294	784	9.6	403	206
	BE	14.0	6.8	14.3	5.4	789	92	8.4	14.5	9.1	379	1.55	262	685	8.6	436	209
E-A3	Ap1	19.6	8.6	12.9	10.1	703	118	8.6	10.1	5.8	474	2.00	360	958	11.5	320	203
	Ap2	19.7	10.0	12.7	11.5	705	122	8.6	9.8	5.7	479	2.26	387	973	11.2	329	217
	BE	15.9	8.4	14.6	7.1	769	97	8.4	13.5	8.1	415	1.72	293	776	8.6	403	197
	E	14.4	6.4	13.2	5.5	772	98	8.8	13.3	8.4	361	1.59	288	733	8.8	426	195
	Br	18.1	6.3	11.1	8.4	681	130	8.8	8.9	4.9	448	2.23	402	923	10.9	351	208
E-A4	Ap1	15.8	7.5	12.6	6.5	738	108	8.6	11.6	7.0	428	2.23	368	828	9.9	325	227
	Ap2	15.6	7.7	12.9	6.6	744	108	8.7	11.7	7.0	432	2.16	363	849	10.3	332	209
	E	14.0	7.3	14.0	5.4	777	98	8.9	13.5	8.3	401	1.96	336	76	9.8	343	196
	BE	13.6	7.0	14.0	5.3	777	97	8.6	13.5	8.5	406	1.83	302	732	8.9	423	212
	Br1	17.4	7.8	11.8	8.8	712	127	8.9	9.5	5.7	512	2.04	386	100	12.4	298	206
	Br2	18.0	8.2	11.4	9.6	701	132	8.8	9.0	5.3	514	2.57	430	104	12.9	274	218
Ref	Ap1	18.5	7.8	13.0	9.2	715	112	8.3	10.8	6.3	466	2.01	353	873	10.5	341	200
	Ap2	15.2	6.5	12.4	6.6	775	97	8.6	13.5	8.6	380	1.6	290	752	9.2	440	193
	Br1	19.9	5.7	11.2	10.7	697	133	8.7	8.9	5.3	462	2.23	401	100	12.0	358	214
	Br2	21.4	7.2	11.1	13.9	663	145	8.4	7.7	4.6	533	2.42	397	107	12.5	323	246

注: 硅铝率 Sa = M(SiO₂)/M(Al₂O₃); 硅铁铝率 Saf = M(SiO₂)/M(Al₂O₃ + Fe₂O₃) Note: Sa = M(SiO₂)/M(Al₂O₃); Saf = M(SiO₂)/M(Al₂O₃ + Fe₂O₃)

同样地,本文也基于土壤微量元素含量对微量元素种类和土壤层次进行了聚类分析(图 4)。在聚类距离为 10 时,元素可分成四组,Rb、Ba、Sc、Li、Be 及总稀土元素(Rare earth element, Σ REE)聚为一组,Nb、Th、U 聚为一组、元素 Sr 和 Zr 单独为一组(图 4a)。土壤发生层次的聚类也获得较好的结果(图 4b),结果显示,以聚类距离 25 为界,土壤剖面中的漂白层与非漂白层明显分成两组,与常量元素的聚类分析结果类似,在漂白层的一组中也存在 Ref 剖面的亚表层。详细观察剖面中土壤微量元素含量的分布可发现(表 5),上述第一组元素 Ba、Rb、Sc、Li、Be 及总稀土 Σ REE 等元素含量在剖面中的变化规律较为一致,均表现为这些元素含量漂白层低于非漂白层,而土壤元素 Zr 的含量在剖面中分布与第一组元素相反,即一般漂白层土壤 Zr 含量较

高。上述第二和第三组元素 Nb、Th、U 和 Sr 的含量未显示明显的差异,故数据未列出。

为了更详细地了解所研究的 5 个剖面各层次土壤稀土元素分布特征,对稀土元素进行了球粒陨石标准化(图 5)。可看出,同一个土壤剖面各层次和不同剖面的稀土元素分布均很相似,均表现为轻稀土(LREE)相对重稀土(HREE)明显的富集,LREE/HREE 比值在 9.62~12.12 之间。有一定 Eu 异常, δ Eu 在 0.62~0.68 之间(因其分布基本一致,故只列出 E-A1、E-A3 及 CK 剖面的球粒陨石标准化曲线图)。相对而言,漂白层中 HREE 元素含量普遍较非漂白层要低,而 LREE 则在各剖面及各层段间没有明显的差异(图 5),显然, Σ REE 在剖面的变化规律(表 5)是由于 HREE 的变化所致。

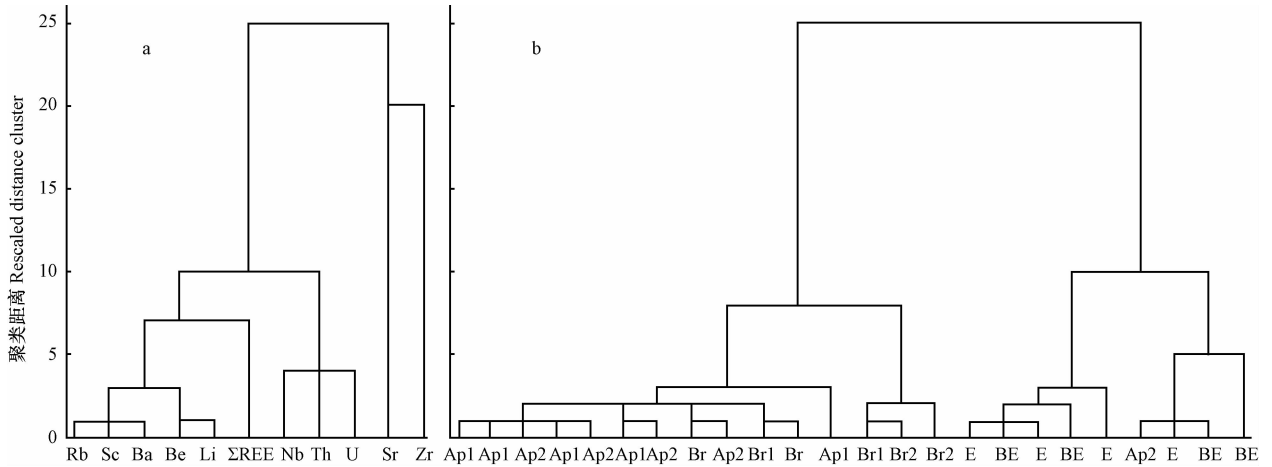


图 4 土壤微量元素(a)、剖面层次(b)的聚类分析树状图

Fig. 4 Cluster analysis dendrograms of soil trace elements (a) and soil horizons (b) in the studied soil profiles

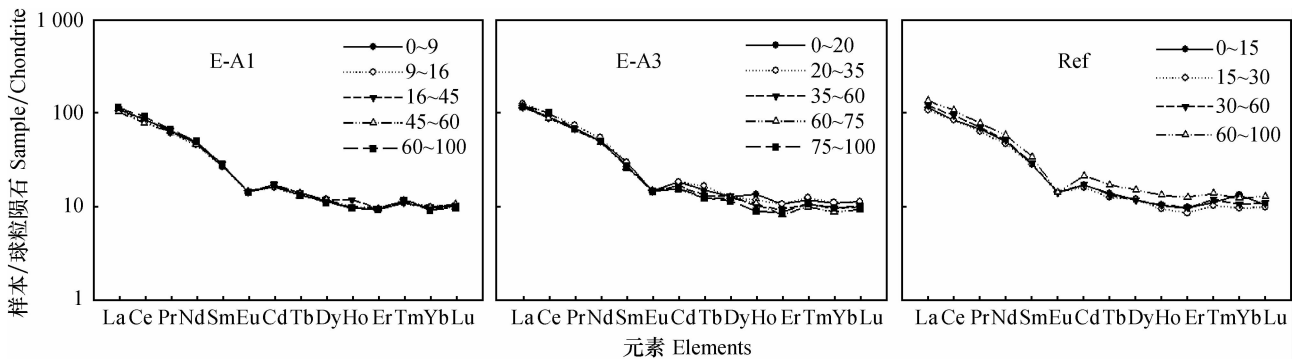


图 5 稀土元素的球粒陨石标准化曲线

Fig. 5 Chondrite-normalized curves in REE of the studied soil profiles

3 讨论

3.1 母质的均一性和同源性判定

土壤发生层次的形成,除了与土壤发育过程相关外,还与母质来源相关^[21]。前人研究的一种观点即是太湖地区土壤中白土层的形成是由于土壤剖面中淡色母质造成的^[7],这种母质可能与其下伏和上覆母质具有不同的物质来源。因此,判断土壤剖面母质的均一性和同源性尤为重要。

剖面形态的野外观测与描述是土体母质均一性判定的第一步,也是最直观的一个方法^[21]。本研究 5 个剖面的形态存在一定的分异,具有漂白层的水耕人为土剖面 E-A1、E-A2、E-A3、E-A4 中不同深度处有厚度不同的灰白色的土层,但是这些分异可能单纯是在水稻特殊的耕作方式(周期性淹水与排干)下所形成,是正常的水耕人为土剖面发育特征,不足以判定母质具有不均一性。剖面 E-A1 漂白层中粉粒含量(75.04%)、中细粉粒、中细粉粒/粗粉粒比值的变异系数(38.05%、61.85%)均远大于其余剖面,说明该剖面母质具有不均一性;此外,其漂白层与其他土层之间晶胶比、活化度等的巨大差异,可能不单纯是土壤发生发育的结果,是母质在不同时期或不同环境条件下沉积的结果。此外,中细粉粒/粗粉粒的比值在其他 4 个剖面中相对较小,虽然均大于 10%,但是最大为 13.59%,远小于未垦滩涂剖面土壤颗粒组成的最大变异系数 31.8%^[22],即这个数值不足以说明母质具有不均一性。

本文所研究的这些水耕人为土各层次应发育于相似物质来源的土壤母质上。首先,土壤剖面中各发生层之间均为渐变过渡,表明这些母质形成时并未出现沉积间断;其次,土壤剖面各土层粉粒含量的变异系数均较低(表 3),小于 10%,按 Xing 等^[23]对东北白浆土母质同源性的判断依据,本文研究的剖面发生层次当属同源母质;此外,从剖面土壤的大量和微量元素较小的变异亦可以得到证实(表 5),而土壤各层次 REE 分布模式的相似性更可证实土壤的同源性^[24-25]。

3.2 漂白层成因分析

既然土壤剖面各层次被判定为同源,且除 E-A1 外均被判定为母质均一,可以认为除 E-A1 外,剖面各层次之间在物理化学性质、常量元素和微量元素含量上的差异应该是由成土作用造成的,而 E-A1

剖面的上述差异除受成土作用影响外,还受沉积环境的影响。尽管有一些性质差异并不大,但在统计学上仍然有意义,基于土壤常量和大量元素聚类分析将土壤剖面中的漂白层与非漂白层明显分开可以得到说明(图 3,图 4)。

另一方面,作为本文研究的水耕人为土形成过程,伴随着周期性淹水与排干,一般存在两个主要成土过程,即活性铁锰淋溶和机械淋洗^[8]。从上述水耕人为土的一系列性质看,两个主要成土过程均有明显的证据。首先,活性铁的淋溶(包括还原淋溶及其之后的铁解淋溶^[26])在所研究的剖面表现的非常明显,全铁、游离铁、活性铁和铁的活化度等,均随着周期性的淹水和排干,在漂白层的上覆和下伏土壤层次积累和增加,而铁的晶胶比显示相反的规律,即在漂白层中增加,表明铁的淋溶已达到相当的程度,尽管品质铁和铁晶化度随着土壤剖面深度的增加逐渐增加,但漂白层中活性铁含量已较少(表 4)。

其次,除了 E-A1 剖面外,所有剖面,在漂白层出现的层次,粉粒含量均明显增加,而紧接漂白层之下,均出现一定程度的黏粒聚集(图 2)。类似地,漂白层的粗粉粒含量较高,而中细粉粒较低。这些应该是机械淋溶的最直观表现。伴随着机械淋溶作用,土壤的地球化学性质也发生了明显的变化,在较细粒土壤中容易积聚的一些微量元素,如 Rb、Li、Ba、HREE 等在漂白层中相对含量较低,而在粗颗粒中相对较易积聚的元素 Zr,则在漂白层中相对含量较高^[27]。

对 Ref 剖面而言,按中国土壤系统分类诊断层诊断标准^[4],15~30 cm 土层的厚度、漂白物质组成、颜色等均符合漂白层的诊断标准,上述物理、化学特征也和其他土壤剖面类似,基于土壤中元素含量的样品聚类分析结果也表明,Ref 剖面的犁底层与其余土壤剖面的漂白层聚为一类,但由于该层次与耕作层重合,不能被诊断为漂白层。然而,其反映的土壤活性铁淋溶和机械淋洗过程应该还是清楚的。另一个值得注意的是,除了 E-A1 剖面外,剖面中活性铁的淋溶和机械淋洗所反映的特征,在空间上均存在一致性,如漂白层的上覆和下伏土层游离铁、Rb、Li、Ba、HREE 等的积累对应较低的粉粒含量,表明两个过程在成因上的联系。

根据徐琪等^[28]的观点,漂白层的形成过程还经历黏粒矿物的蚀变过程。本文的部分证据证实了这一观点,首先从各土层的黏粒矿物的变化可看

出,在漂白层中风化程度较强的黏土矿物,如蒙脱石、蛭石等矿物相对于风化作用较弱的水云母和绿泥石等矿物含量要高(表 1)。根据徐琪等^[28]的观点,随着黏粒矿物晶格的破坏,还会出现硅粉。相应地,这些特征导致了土壤中大量元素的地球化学特征发生相应的变化,即漂白层中 Al、Fe 等降低,而 Si 的含量增加,使得其 Sa 和 Saf 值明显高于上覆和下伏土层(表 5),同时,漂白层黏粒矿物的蚀变也是铁解淋溶的结果之一^[26]。

值得注意的是,剖面 E-A1 中粉粒含量随土壤深度的增加而逐渐增加,并未像其他土壤剖面那样,在下伏游离铁聚集处,出现粉粒含量的降低或黏粒含量的增加(图 2),其他土壤地球化学性质也未在下伏土层出现变化(表 3、表 4)。同时,尽管整个剖面土壤粉粒含量变异并不大,但中细粉粒和粗粉粒含量及它们的比值的变异却很大(表 2)。此外,该剖面蒙脱石含量相对较高而绿泥石相对较低。这些事实均说明,该剖面的机械淋洗作用,矿物蚀变过程明显较其他剖面强,且与活性铁的淋溶在空间上并不一致。联系到剖面距离太湖较近,地下水位较浅,推断其在母质形成后,受太湖水位升降的影响较大,当水位较高时,表面产生潜育化(表 1、图 1),铁的活性增加,当水位下降时,淋洗作用较强,较多的黏粒被带走,后期水耕过程中,淹水和排干已难以产生机械淋洗,主要以铁的淋溶为主。

综上所述,太湖地区水耕人为土漂白层的形成,可以由黄土性泻湖相沉积物经过水耕过程中水分的周期性淹水和排干,通过机械淋洗和活性铁的淋溶而形成(剖面 E-A2、E-A3、E-A4),也可以是母质沉积的过程中由于沉积环境的变化(主要是太湖水位的升降变化),受湖水水面升降,导致机械淋溶,然后水耕过程叠加活性铁的淋溶而形成(剖面 E-A1)。并非一定发育在淡色母质上,只是在淡色母质上较易形成漂白层而已。同时,也说明漂白层在水耕过程中一直在进行着^[29]。

4 结 论

太湖地区水耕人为土中漂白层的物理、化学和地球化学特征的研究结果表明,土壤机械组成、大量元素、微量元素含量在剖面中较低的变异,各土层相似的 REE 元素分配等特征可指示漂白层与上覆和下伏土层具有同源性,他们发育在相同的土壤母质上。所以,土壤粉粒含量、矿物组成及含量、游

离铁含量、大量和微量元素含量等性质在剖面中的变异,是由于水耕过程中水分的周期性淹水和排干,通过机械淋洗和活性铁的淋溶而造成的(如:剖面 E-A2、E-A3、E-A4);亦或在距离太湖较近、地下水位较浅处,母质受湖水水面升降导致机械淋溶,然后水耕过程叠加活性铁的淋溶而形成(如:剖面 E-A1)。显示了水耕人为土中漂白层多成因的特点。

参 考 文 献

- [1] 龚子同,等. 中国土壤系统分类:理论·方法·实践. 北京:科学出版社,1999. Gong Z T, et al. Chinese soil taxonomy: Theory, methodology and practices (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999
- [2] 龚子同,张甘霖,陈志诚,等. 土壤发生与系统分类. 北京:科学出版社,2007. Gong Z T, Zhang G L, Chen Z C, et al. Soil genesis and taxonomy (In Chinese). Beijing: Science Press, 2007
- [3] 李庆远. 中国水稻土. 北京:科学出版社,1992. Li Q K. Paddy soils of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1992
- [4] 中国科学院南京土壤研究所土壤分类课题组,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. 第 3 版. 合肥:中国科学技术大学出版社. 2001. Chinese Soil Taxonomy Research Group, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. Keys to Chinese soil taxonomy (In Chinese). 3rd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001
- [5] 江苏省土壤普查办公室. 江苏土壤. 北京:中国农业出版社,1995. Soil Survey Office of Jiangsu Province. Jiangsu soil (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1995
- [6] 于天仁,谢建昌,杨国治,等. 太湖流域低产“白土”的成因及其改良. 土壤学报,1959,7(1/2):42—58. Yu T R, Xie J C, Yang G Z, et al. Studies on the infertile “White Soil” in Taihu Lake region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1959, 7(1/2):42—58
- [7] 周传槐. 江苏省的“白土”水稻田. 土壤学报,1958,6(4):217—227. Zhou C H. The so-called “Bai-tu” paddy soils in Jiangsu Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1958, 6(4):217—227
- [8] 徐琪. 长江中下游白土的分布规律及其形成过程的特点. 土壤学报,1962,10(1):44—54. Xu Q. Distribution law and formation process characteristics of the White-bleached soils in the middle and lower reaches of Yangtze (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1962, 10(1):44—54
- [9] 熊毅. 水稻土的化学性质. 土壤特刊,1941,甲种 4 号. Hseung Y. Some chemical properties of paddy soil (In Chinese). Special Soil Publication, 1941, Series A, No. 4
- [10] Xu Z Y, Chen J F. Differentiation of iron oxides in paddy soils in Taihu Lake region. Proceedings of symposium on paddy soil. Beijing and Springer-Verlag, Berlin: Science Press, 1981:471—474
- [11] Tan K H. The genesis and characteristics of paddy soil in Indonesia. Soil Science and Plant Nutrition, 1968, 14:117—121

- [12] 朱莲青,马溶之,宋达泉,等. 水稻土土层分类及命名概则. 土壤特刊,1938,乙种4号. Zhu L Q, Ma R Z, Song D Q, et al. Soil layer classification and naming convention of paddy soil (In Chinese). Special Soil Publication,1938, Series B, No. 4
- [13] FAO. Guidelines for soil description. 4th ed. Rome: FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2006:1—97
- [14] 中国科学院南京土壤研究所,中国科学院西安光学精密机械研究所. 中国标准土壤色卡. 南京:南京出版社,1989. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS. New standard soil colour charts (In Chinese). Nanjing: Nanjing Press, 1989
- [15] USDA. Soil Survey Manual. USDA Agricultural Handbook. 18th vol. Washington D C: U. S. Government Print Office, 1993
- [16] 熊毅,傅积平,陈家坊,等. 土壤胶体. 第二册. 北京:科学出版社,1985. Hseung Y, Fu J P, Chen J F, et al. Soil colloid (In Chinese) 2nd vol. Beijing: Science Press, 1985
- [17] 张甘霖,龚子同. 土壤调查实验室分析方法. 北京:科学出版社,2012. Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods (In Chinese). Beijing: Science Press, 2012
- [18] Mehra O P, Jackson M L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite system buffered with sodium bicarbonate. Clays and Clay Minerals, 1960, 7: 317—327
- [19] McKeague J A, Day J H. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. Canadian Journal of Soil Science, 1966, 46: 13—22
- [20] 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. Lu R K. Agricultural methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [21] Schaetzl R J. Lithologic discontinuities in some soils on drumlins: Theory, detection, and application. Soil Science, 1998, 163 (7): 570—590
- [22] Evans L J, Adams W A. Quantitative pedological studies on soils derived from silurian mudstones. IV. Uniformity of the parent material and evaluation of internal standards. European Journal of Soil Science, 1975, 26: 319—326
- [23] Xing B S, Liu X B, Zhang Z Y, et al. Evaluation of parent material uniformity of white clay soils in Heilongjiang Province, China. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2004, 35 (13/14): 1839—1850
- [24] 陈俊,王鹤年. 地球化学. 北京:科学出版社,2004. Chen J, Wang H N. Geochemistry (In Chinese). Beijing: Science Press, 2004
- [25] 邢光熹,朱建国. 土壤微量元素和稀土元素地球化学. 北京:科学出版社,2003. Xing G X, Zhu J G. Geochemistry of soil trace and rare earth elements (In Chinese). Beijing: Science Press, 2003
- [26] Brinkman R. Ferrollysis a hydromorphic soil forming process. Geoderma, 1970, 3: 199—206
- [27] 刘连文,陈骏,陈咏,等. 最近 13ka 以来黄土高原 Zr/Rb 值变化及其对冬季风的指示意义. 科学通报,2002, 47 (9): 702—706. Liu L W, Chen J, Chen Y, et al. The Zr/Rb value changes and its denotative meaning to winter monsoon of the Loess Plateau in the last 13ka (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 2002, 47 (9): 702—706
- [28] 徐琪,陆彦椿,刘元昌. 中国太湖地区水稻土. 上海:上海科学技术出版社,1980. Xu Q, Lu Y C, Liu Y C. The paddy soil of Taihu Lake region in China (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1980
- [29] Kanno I. Genesis of rice soils with special reference to profile development. No publication, 1977

CAUSES OF FORMATION OF ALBIC HORIZON IN STAGNIC ANTHROSOL IN THE TAIHU LAKE REGION, JIANGSU PROVINCE, CHINA

Wang Peiyan¹ Huang Biao^{2†} Wang Hong² Pan Jianjun^{1†}

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 Soil Environment and Pollution Remediation Laboratory, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract The formation of an albic horizon in stagnic anthrosol has a special significance to genesis and development of the soil. To explore causes of the formation, four profiles of stagnic anthrosols with an albic horizon (E-A1, E-A2, E-A3 and E-A4) and one (Ref), the same in parent material but without the horizon, as reference, in the Taihu Lake region were sampled for analysis of morphological characteristics, soil mechanical composition, clay mineral composition, contents of iron oxides, and geochemical characteristics of macro and trace elements. Of the five soil profiles, soil particle size compositions were dominated with silt, which accounted for 60%~75% and did not vary much between soil layers in the profile, with variation coefficient being < 10%. Contents of macro and trace elements did not vary much either, with CVs being less than 10%. All these indicated albic horizons developed from parent materials similar to those the overlying and the underlying layers did from. However, in Profile E-A1, the albic horizon was quite high in silt content (75.04%) and in

CV of medium-fine silt (38.05%) and medium-fine silt/coarse silt (61.85%) as well, which indicates that the profile is not uniform in parent material. All these demonstrate that the variations of soil properties in Profiles E-A2, E-A3, E-A4 and Ref were caused by soil formation, while that in Profile E-A1 was also affected by the environment of sedimentation, besides soil formation. The albic horizons in Profiles E-A2, E-A3 and E-A4 are higher than their overlying and the underlying horizons in contents of smectite, illite, silt, coarse silt, SiO_2 , CaO and Zr, but lower in contents of hydromica, chlorite, free iron, Al_2O_3 , Rb, Li, Ba and REE. Profile Ref was quite similar to Profile E-A2, E-A3, E-A4 in all characteristics except that the albic process appeared only in the plow layer, which is not fit to be defined as albic horizon. In Profile E-A1, some soil properties were not spatially homogeneous, for instance, silt content is not the highest in the albic horizon, but increased with depth in the soil profile, which suggests that the formation of an albic horizon in stagnic anthrosols in the Taihu Lake region is a result of the subjection of loessial lagoon sediments to periodical alternation of flooding and draining mechanical washing and leaching of active iron during anthrostagnic process (Profiles E-A2, E-A3 and E-A4), or a result of the subjection of parent material to mechanical washing caused by rise and fall of the water surface in the lake during its sedimentation process and then to leaching of active iron during repeated anthrostagnic processes (Profile E-A1).

Key words Albic horizon; Parent materials; Mechanical washing; Leaching of iron; Homology

(责任编辑:卢 萍)