

母质对南方丘陵区水耕人为土理化性质演变的影响*

韩光中^{1,2,3} 张甘霖^{2,3†}

(1 内江师范学院地理与资源科学学院, 四川内江 641112)

(2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 基于时间序列系统分析了我国南方丘陵区三种母质起源的水耕人为土理化性质的演变, 结果表明: 成土母质可以决定黏粒与土壤有机碳(SOC)对人为水耕成土过程的敏感性, 明显影响其演变特征。游离铁(Fe_d)对人为水耕的成土过程非常敏感, 其迁移与转化主要受人为水耕成土过程影响, 受成土母质影响很小; 硅酸盐铁(Fe_e-Fe_d)对人为水耕的成土过程不敏感, 但全铁(Fe_t)含量的分布主要受 Fe_d 的影响。黏粒的淋失会对土壤中元素的迁移与分布产生重要影响, 造成 SiO_2 相对富集和 Al_2O_3 相对亏损, 在利用由Al和Si两种元素计算所得的一些指标指示丘陵区水耕人为土的发育程度时一定要慎重; 而 TiO_2 在水耕人为土发育过程中相对稳定, 可以作为稳定元素来指示水耕人为土演变过程中其他元素的迁移率。

关键词 水耕人为土; 时间序列; 母质; 演变特征

中图分类号 S151^{+.3} **文献标识码** A

水耕人为土是我国最重要的土壤资源之一, 其作为重要的粮食生产基地^[1]与有机碳(SOC)库^[2-3]及温室气体—— CH_4 的重要排放源^[4-5], 其发生与演变过程对土壤管理有重要的意义, 因而受到了广泛的关注^[6-10]。一般而言, 土壤发育速率的快慢取决于土壤自身对外部成土因素的响应^[11], 但土壤不同组分的响应并不一致^[12], 因此, 有必要研究水耕人为土的不同属性对外部成土因素的敏感性。成土母质在决定土壤理化性质中发挥了重要的作用^[13], 虽然不同母质起源的土壤淹水种稻一定时间后均可以发育为水耕人为土, 但母质不同很可能导致其演变速率与特征存在一定的差异。因此母质如何影响水耕人为土的演变也是人为土研究中一个值得探讨的问题。为此本研究选择南方丘陵区三种常见母质(紫色砂页岩、第四纪红黏土和红砂岩母质)发育的水耕人为土时间序列作为研究对象, 旨在揭示水耕人为土不同属性对外部成土因素的敏感性, 更好的理解母质在其演变过程中的作用。

1 材料与方法

1.1 样品采集

紫色砂页岩、第四纪红黏土和红砂岩母质是我国南方较为常见的成土母质, 这三种母质起源的自然土壤有着各自鲜明的特点, 差异很大。因此, 本研究共选择了三个研究区(图1): 广西龙胜各族自治县(龙脊梯田)($25^{\circ}50' N$ 、 $110^{\circ}10' E$, 年均气温 $18.2^{\circ}C$, 年均降雨量 $1557 mm$, 紫色砂页岩母质)、江西省鹰潭市($28^{\circ}15' N$ 、 $116^{\circ}55' E$, 年均气温 $17.6^{\circ}C$, 年均降雨量 $1795 mm$, 红砂岩母质)和进贤县($28^{\circ}15' N$ 、 $116^{\circ}20' E$, 年均气温 $17.3^{\circ}C$, 年均降雨量 $1549 mm$, 第四纪红黏土母质)。

时间序列的建立和相关描述见 Han 和 Zhang^[14]。土壤种稻年限是基于地形部位结合已调查的土壤种稻年限与当地村寨历史综合判定^[14-15], 之后又基于 Harden^[16]提出剖面发育指数和 Carré 和 Jacobson^[17]提出的属性距离进行验证^[15]。每个

* 国家自然科学基金项目(41071142)、中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-EW-405-1)资助

† 通讯作者, E-mail: glzhang@issas.ac.cn

作者简介: 韩光中(1981—), 男, 山东费县人, 博士, 主要从事土壤学研究。E-mail: hanguangzhong@163.com

收稿日期: 2013-11-13; 收到修改稿日期: 2014-02-11

时间序列选择 4 个土壤剖面按发生层采集土样(剖面描述见表 1,剖面照片见图 2)。所有土壤样本均在水稻收割后采集,土壤剖面选在稻田的中心部位,坡底剖面避开容易积水的洼地。三个研究区的年均温度和年均降雨量相差不大,而且人为水耕改变了成土因素,会大大减小气候对土壤发生的影响^[18],因此本研究可认为气候对三个研究区水耕人为土发生的影响作用基本一致,不再单独讨论。

1.2 测定项目与分析方法

土壤有机碳采用重铬酸钾-硫酸硝化法测定;土壤容重采用环刀-烘干法测定;pH(水土比 2.5:1)采用电位法测定;土壤颗粒组成采用湿筛-吸管法测定;游离铁(Fe_d)采用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠浸提(DCB)-原子吸收测定^[19];大量元素(全量)采用偏硼酸锂($LiBO_2$)熔融^[20]-ICP-AES(ICP-AES, IRIS Advantage)测定。

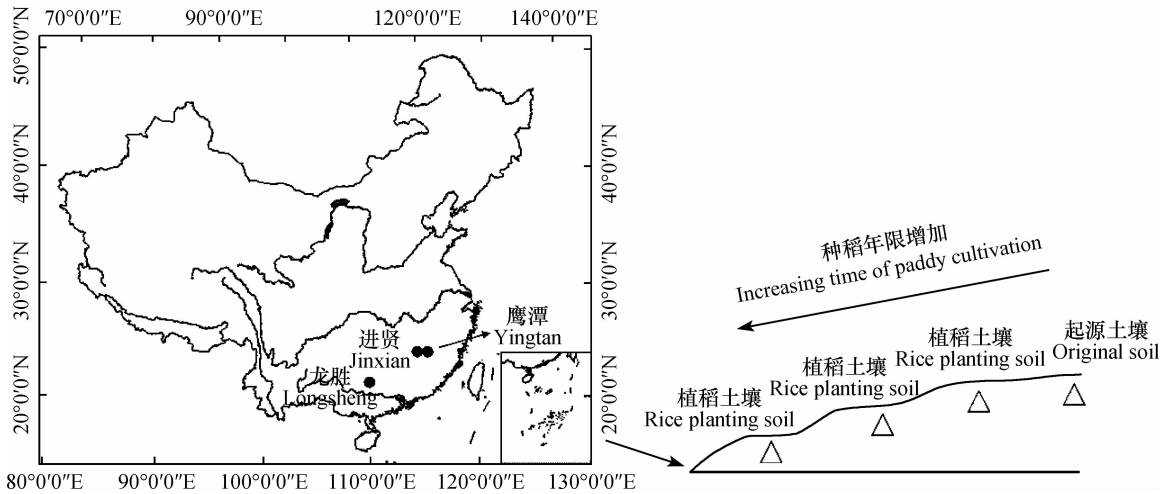


图 1 研究区样点分布与采样设计

Fig. 1 Distribution of the sampling sites in the study area and sampling scheme

表 1 剖面样点的基本信息

Table 1 Descriptions of the studied soil profiles

母质 Parent materials	剖面编号 ID	位置 Locations	利用方式 Land use	种稻年限 Cultivation age (a)	坡度 Gradients (°)	海拔 Elevations (m)	土壤类型 Soil type
紫色砂页岩 Purple sandy shale	PS10	坡顶 ^①	荒地 ^④	0	23	1 104	酸性紫色湿润雏形土 ^⑦
	PS11	坡顶 ^①	双季稻 ^⑤	约 30	23	1 099	水耕淡色潮湿雏形土 ^⑧
	PS12	坡中 ^②	双季稻 ^⑤	100 ~ 300	36	935	普通铁聚水耕人为土 ^⑨
	PS13	坡底 ^③	双季稻 ^⑤	约 300	28	807	普通铁聚水耕人为土 ^⑨
第四纪红黏土 Quaternary red clays	RC10	坡顶 ^①	荒地 ^④	0	<6	52	普通黏化湿润富铁土 ^⑩
	RC11	坡顶 ^①	油菜-水稻 ^⑥	约 100	<6	45	普通铁聚水耕人为土 ^⑨
	RC12	坡中 ^②	油菜-水稻 ^⑥	100 ~ 300	<6	34	普通铁聚水耕人为土 ^⑨
	RC13	坡底 ^③	油菜-水稻 ^⑥	约 300	<6	32	普通铁聚水耕人为土 ^⑨
红砂岩 Red sandstone	RS10	坡顶 ^①	荒地 ^④	0	<6	63	普通酸性湿润雏形土 ^⑪
	RS11	坡顶 ^①	油菜-水稻 ^⑥	约 30	<6	48	水耕淡色潮湿雏形土 ^⑧
	RS12	坡中 ^②	油菜-水稻 ^⑥	60 ~ 200	<6	38	普通铁聚水耕人为土 ^⑨
	RS13	坡底 ^③	油菜-水稻 ^⑥	约 200	<6	36	普通铁聚水耕人为土 ^⑨

① Top of the slope, ② Middle of the slope, ③ Bottom of the slope, ④ Waste upland, ⑤ Double rice, ⑥ Rice-rape rotation, ⑦ Aci-Pup-Udic Cambisols, ⑧ Ans-Och-Aquic Cambisols, ⑨ Typ-Fec-Hydragic Anthrosol, ⑩ Typ-Arg-Udic Ferrisols, ⑪ Typ-Aci-Udic Cambisols

2 结 果

将同一时间序列(同母质)的种稻土壤分为一组(3个剖面,例如 PS11、PS12 和 PS13),起源土壤分为另一组(1个剖面,例如 PS10),分别计算种稻土壤与起源土壤基本理化性质的均值(指同母质起源土壤和种稻土壤所有发生层的平均值)和标准差(表 2)。统计结果同时显示了种稻土壤与起源土壤基本理化性质的均值差异,其近似认为是 0~300 a 内(红砂岩母质土壤为 0~200 a 内)种稻土壤与起源土壤基本理化性质的平均差异,这样可以避免个体差异对统计结果的影响。

表 2 种稻土壤与起源土壤基本属性的差异性结果

Table 2 Comparison between rice planting soils and their respective original soils in basic properties

土壤属性 Soil properties	土壤类型 Soil types	紫色砂页岩母质 Purple sandy shale			第四纪红黏土母质 Quaternary red clays			红砂岩母质 Red sandstone		
		平均值 ¹⁾	标准差	<i>P</i>	平均值	标准差	<i>P</i>	平均值	标准差	<i>P</i>
		Mean	SD		Mean	SD		Mean	SD	
黏粒 Clay (%)	起源土壤 ^①	13.41	0.30	0.088	40.20	2.17	0.873	18.24	6.03	0.112
	种稻土壤 ^②	16.52	3.35		29.92	5.95		11.58	5.03	
有机碳 SOC (g kg ⁻¹)	起源土壤 ^①	3.83	3.90	0.042	2.82	1.91	0.001	3.55	2.82	0.881
	种稻土壤 ^②	10.32	7.75		8.65	6.55		3.14	2.56	
全铁 Fe _t (g kg ⁻¹)	起源土壤 ^①	50.90	1.77	0.001	64.78	4.24	0.003	31.98	13.68	0.004
	种稻土壤 ^②	46.95	12.43		48.97	14.43		24.18	10.47	
游离铁 Fe _d (g kg ⁻¹)	起源土壤 ^①	23.37	1.98	0.004	54.77	7.03	0.033	23.32	15.69	0.006
	种稻土壤 ^②	19.37	12.52		35.74	13.81		17.08	11.14	
硅酸盐铁 Fe _t -Fe _d (g kg ⁻¹)	起源土壤 ^①	27.53	1.83	0.245	8.86	3.04	0.175	8.92	2.76	0.679
	种稻土壤 ^②	27.05	4.41		13.22	6.16		7.37	4.54	

注:1)平均值指同母质起源土壤或种稻土壤所有发生层的平均值(非加权平均),下同 Note: Mean value here refers to average of the entire soil profile of the original soils or the rice planting soils. The same below. ①Original soils, ②Rice planting soils

2.2 土壤有机碳

紫色砂页岩和第四纪红黏土母质种稻土壤的 SOC 平均含量与它们的起源土壤相比有明显的增加(平均分别增加了约 169% 和 207%),而且也达到了显著性差异($p < 0.05$)。红砂岩母质种稻土壤的 SOC 平均含量与该母质起源土壤相比未增加,且两者之间未达到显著性差异($p = 0.881$)(表 2)。这说明紫色砂页岩和第四纪红黏土母质土壤种稻后 SOC 相对容易累积,而红砂岩母质的土壤种稻后 SOC 很难累积。

2.1 黏 粒

由表 2 可以看出,第四纪红黏土与红砂岩母质种稻土壤黏粒较其起源土壤有所降低(平均分别降低了约 26% 和 37%);紫色砂页岩母质种稻土壤黏粒的平均含量较其起源土壤有一定的增加(平均增加了约 23%)。这三种母质种稻土壤黏粒的平均含量与其起源土壤相比,均未达到显著性差异($p > 0.05$)(表 2)。这说明土壤黏粒在所研究的时间尺度内并未由于人为水耕产生统计意义上的显著差异。三种母质水耕人为土时间序列的黏粒剖面分布如图 3 所示。第四纪红黏土与红砂岩母质土壤种稻后黏粒含量逐步降低,也基本体现出随着种稻时间的增加而逐渐降低的趋势。紫色砂页岩母质土壤种稻后黏粒未降低,剖面下部甚至有较明显的增加。

三种母质水耕人为土时间序列的 SOC 剖面分布如图 3 所示。紫色砂页岩和第四纪红黏土母质土壤种稻后 SOC 的剖面分布规律类似: SOC 含量均随土壤深度的增加而下降,种稻土壤耕作层的 SOC 含量均明显高于起源土壤;坡顶种稻年限较短的土壤与起源土壤相比,耕作层 SOC 含量增加明显,但耕作层以下增加不明显;坡中和坡底种稻时间较长的土壤与起源土壤相比, SOC 在下层也有较明显的增长。说明在种稻初期,这两种母质种稻土壤 SOC 的增加主要集中在耕作层,到一定阶段后,下层也表

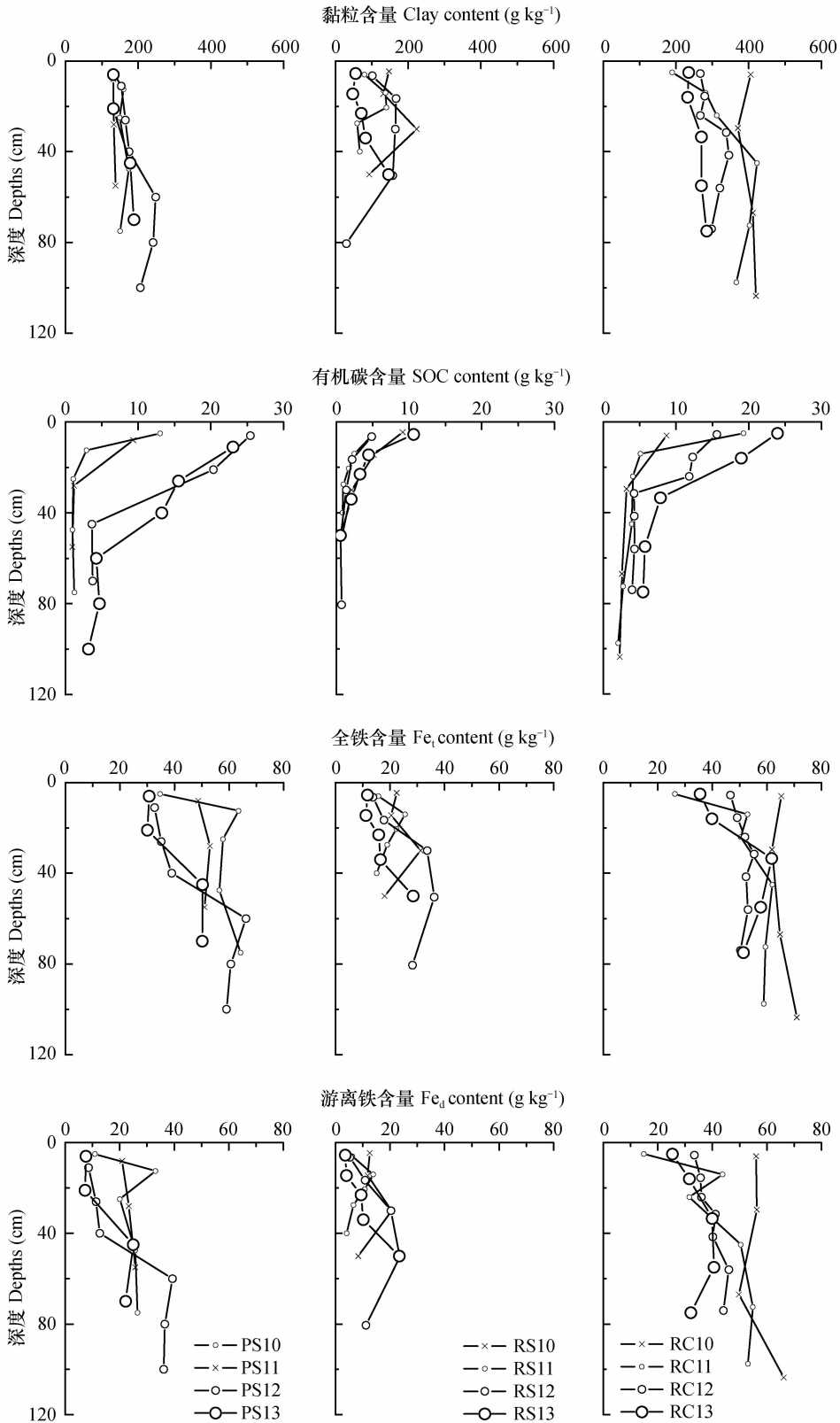


图3 不同母质水耕人为土时间序列基本理化性质的剖面分布

Fig. 3 Chronosequence variations of basic soil physico-chemical properties in soil profiles of Hydragric Anthrosols different in parent material

现出明显增加。相比之下,红砂岩母质的起源土壤种稻后 SOC 没有明显累积,坡顶和坡中种稻土壤的 SOC 含量甚至低于起源土壤,而坡底种稻约 200 a 的土壤也未表现出较起源土壤有大幅度的增加。

2.3 全铁 (Fe_t) 与游离铁 (Fe_d)

紫色砂页岩、第四纪红黏土和红砂岩母质上发育的植稻土壤的 Fe_d 平均含量和它们各自的起源土壤相比明显降低(平均分别降低了约 17%、35% 和 27%),而且也达到了显著性差异($p < 0.05$, 表 2)。这说明丘陵区水耕人为土在发育过程中 Fe_d 对人为水耕的成土过程非常敏感。三种不同母质起源水耕人为土时间序列的 Fe_d 剖面分布如图 3 所示。紫色砂页岩和第四纪红黏土母质的起源土壤 Fe_d 的剖面分布通常表现出相对均一性,而红砂岩母质的起源土壤剖面内部变异较大。种稻后 Fe_d 含量均逐渐降低,也基本体现出随着种稻时间的增加而逐渐降低的趋势。本研究中 Fe_t 的剖面分布和 Fe_d 的剖面

分布异常相似(图 3),且 Fe_t 与 Fe_d 含量呈极显著线性正相关($r = 0.89$, $n = 59$, $p < 0.01$)。三种母质种稻土壤的 Fe_t 平均含量和它们各自的起源土壤相比也明显降低,而且也均达到了显著性差异($p < 0.05$)。但紫色砂页岩、第四纪红黏土和红砂岩母质种稻土壤的 Fe_t 与 Fe_d 的差值(一般认为是原生含铁矿物,主要是硅酸盐铁)($Fe_t - Fe_d$)和它们各自的起源土壤相比没有明显的变化,也未达到显著性差异。这说明土壤种稻后,土壤中的硅酸盐铁对人为水耕过程不敏感,土壤全铁含量的变化主要是由游离铁的迁移引起的。

2.4 大量元素

由表 3 可以看出,紫色砂页岩、第四纪红黏土和红砂岩母质种稻土壤 Al_2O_3 (全量,下同)平均含量与它们的起源土壤相比有一定的亏损(平均分别降低了约 6%、29% 和 33%);这三种母质种稻土壤 SiO_2 平均含量与它们的起源土壤相比有一定的富集

表 3 种稻土壤与起源土壤大量元素的差异分析

Table 3 Comparison between rice planting soils and their respective original soils in major elements

土壤属性 Soil properties	土壤类型 Soil types	紫色砂页岩母质 Purple sandy shale			第四纪红黏土母质 Quaternary red clays			红砂岩母质 Red sandstone		
		平均值 Mean	标准差 SD	p	平均值 Mean	标准差 SD	p	平均值 Mean	标准差 SD	p
全铝	起源土壤 ^①	169.0	7.75	0.271	155.4	9.95	0.014	88.33	30.09	0.069
Al_2O_3 (g kg ⁻¹)	种稻土壤 ^②	159.4	23.50		110.0	25.57		59.38	17.07	
全钙	起源土壤 ^①	0.50	0.29	0.102	0.35	0.07	0.001	0.60	0.25	0.179
CaO (g kg ⁻¹)	种稻土壤 ^②	0.65	0.18		1.69	0.37		0.81	0.34	
全钾	起源土壤 ^①	32.04	1.12	0.086	13.71	1.17	0.188	9.71	4.52	0.087
K_2O (g kg ⁻¹)	种稻土壤 ^②	26.50	4.62		14.12	1.88		8.23	5.13	
全镁	起源土壤 ^①	5.30	0.36	0.345	5.85	0.76	0.316	3.62	0.76	0.171
MgO (g kg ⁻¹)	种稻土壤 ^②	7.22	1.71		4.65	1.19		3.60	2.71	
全锰	起源土壤 ^①	0.66	0.08	0.034	0.34	0.06	0.001	0.17	0.06	0.039
MnO (g kg ⁻¹)	种稻土壤 ^②	0.69	0.29		0.64	0.59		0.10	0.04	
全钠	起源土壤 ^①	0.96	0.06	0.252	0.92	0.11	0.001	1.77	1.13	0.678
Na_2O (g kg ⁻¹)	种稻土壤 ^②	1.57	1.28		1.63	3.68		1.58	1.47	
全磷	起源土壤 ^①	0.43	0.25	0.836	0.59	0.09	0.014	0.24	0.05	0.020
P_2O_5 (g kg ⁻¹)	种稻土壤 ^②	0.62	0.25		0.90	0.30		0.38	0.25	
全钛	起源土壤 ^①	5.70	0.36	0.274	10.04	0.65	0.069	4.19	1.09	0.124
TiO_2 (g kg ⁻¹)	种稻土壤 ^②	6.29	0.74		8.88	0.98		3.87	0.99	
全硅	起源土壤 ^①	680.8	10.57	0.197	695.2	15.30	0.029	802.6	36.80	0.130
SiO_2 (g kg ⁻¹)	种稻土壤 ^②	689.8	29.13		753.7	38.11		846.5	145.42	

① Original soils, ② Rice planting soils

(平均分别增加了约 1%、8% 和 5%)。其中第四纪红黏土母质种稻土壤 Al_2O_3 和 SiO_2 平均含量与起源土壤相比甚至均达到了显著性差异 ($p < 0.05$)。这似乎与水耕人为土中的元素迁移^[1]相矛盾(因为根据水耕人为土中的元素的迁移系数, Al 的稳定性较强, 要较 SiO_2 更难迁移)。实际上, 研究区土壤的 Al_2O_3 相对富集于黏粒, 以第四纪红黏土母质土壤为例, 土壤 Al_2O_3 全量与黏粒呈极显著线性正相关 ($r=0.94, n=22, p < 0.01$), 这说明黏粒对 Al_2O_3 全量贡献很大。由于南方丘陵区水耕人为土的土壤机械淋溶较强, 可造成黏粒的淋失(见表 2 中黏粒含量变化)。因此, Al_2O_3 全量的亏损主要可能是由于土壤机械淋溶造成的, 这也表明丘陵区种稻土壤的机械淋溶会对元素的剖面分布产生重要影响。

紫色砂页岩母质起源土壤 K_2O 含量较高, 种稻后平均约降低了 17%, 脱钾现象明显; 红砂岩母质起源土壤 K_2O 含量种稻后降低了约 15%, 而第四纪红黏土 K_2O 含量变化甚微, 平均仅增加了约 3%。这总体上说明人为水耕的成土过程利于土壤脱钾。但本研究也表明, 并不是所有土壤种稻后 K_2O 全量均下降(例如第四纪红黏土母质土壤), 而且三种母质种稻土壤的 P_2O_5 、CaO 全量也均略有富集(起源土壤 P_2O_5 、CaO 全量极低)。这表明种稻后这几种元素变化不仅与母质的水解淋溶有关, 还与肥料(复合肥、钾肥和磷肥等)和石灰(酸性改良)的施用有关。这三种母质种稻土壤 TiO_2 的平均含量与起源土壤相比, 均未达到显著性差异 ($p > 0.05$), 这说明在水耕人为土发育过程中 TiO_2 相对稳定, 说明其对人为水耕成土过程不敏感。

3 讨 论

影响土壤发育的因素可归为两类, 一类是外部因素, 称为外因; 另一类就是土壤自身, 也称内因。就丘陵区的水耕人为土而言, 最主要的外部成土因素为人为水耕, 且淹水时土壤均处于较强的淋溶过程中, 可认为外部的成土因素类似。因此, 黏粒与 SOC 在不同母质水耕人为土中演变差异应主要归于土壤自身(内因)。在水耕人为土发育过程中, 机械淋溶、还原淋溶、络合淋溶、铁解淋溶等过程^[18]均能造成土壤黏粒的损失。尽管如此, 并不是所有的土壤种稻后黏粒含量均较它们的起源土壤低, 这可能是因为物质的输入(外因)或自生(例如转化或螯合等, 内因)会补充部分黏粒, 当补充的黏粒高于损

失的, 其含量表现为增加, 否则, 表现为下降。考虑到三种母质水耕人为土外部成土因素类似, 紫色砂页岩母质土壤种稻后黏粒含量的增加应主要由土壤自身变化(内因)引起的, 今后需加强这方面的研究。笔者利用逐步回归的方法对地形(坡度、海拔)、气候(年均降雨量、年均气温)、土壤理化性质与种稻年限等参数进行筛选, 发现水耕人为土耕作层有机碳含量与土壤颗粒关系最为密切, 丘陵区水耕人为土的固碳潜力可能主要与土壤质地有关^[21]。从红砂岩母质种稻土壤有机碳含量甚至较起源土壤低来看, 质地对有机碳固定的影响作用在不同土地利用方式下可能并不完全相同。土壤颗粒大小组成的差异可能是丘陵区不同母质水耕人为土有机碳累积特征出现差异的根本原因, 因此母质的影响作用可通过影响土壤颗粒大小组成表现出来。这均说明成土母质(或土壤自身)可以决定或影响土壤某些属性对人为水耕成土过程的敏感性。

尽管三种母质起源土壤自身的理化性质有明显的差异, 但种稻后 Fe_d 的演变趋势类似, 均是随着种稻时间的增加而逐渐降低。这表明丘陵区水耕人为土 Fe_d 的迁移与转化主要受控于外部人为水耕的成土因素(外因), 与土壤自身(内因)关系不大。 Fe_d 是水耕人为土分类的一个重要指标, 由于其迁移转化主要受外部人为水耕成土因素的影响, 一定程度上可以解释水耕人为土的“异源同土”现象(表 1)。由于硅酸盐铁的水解过程是不可逆的, 且种稻之后含量并未明显降低, 说明丘陵区水耕人为土在发育过程中硅酸盐铁是相对稳定的, 这也说明了 Fe_d 的含量分布特征主要受 Fe_d 的影响。

黏粒的淋失会对元素的剖面分布产生重要影响, 导致 SiO_2 相对富集, Al_2O_3 相对亏损, 这一结果与自然土壤或一些其他类型水耕人为土的演变趋势有明显的差别。这主要是由物理过程引起的, 与由化学淋溶导致的脱硅富铝化过程^[22]有本质的不同, 并不能说明 Al_2O_3 较 SiO_2 对外部人为水耕的成土过程敏感。因此, 在利用由 Al 和 Si 两种元素计算所得到的一些指标(例如硅铝率、硅铁铝率等)指示丘陵区水耕人为土的发育程度时一定要慎重。而 K_2O 、 P_2O_5 、CaO 等的变化不仅与母质的水解淋溶有关, 还与肥料的施用有关, 因此也应避免使用这些参数来指示水耕人为土的发育程度。土壤 TiO_2 相对稳定, 而且其含量相对也较高, 产生取样和分析误差也较低, 可作为南方丘陵区水耕人为土的稳

定元素来指示其他元素的迁移率,这与已有的研究结果一致^[23]。

需要指出的是,本研究中水耕人为土序列其实并非单纯的时间序列,在一定程度上也受到地形的影响,不同的地形部位可能种稻年限也不尽相同,此外,由于地形的影响作用,土壤的一些理化性质在演变过程中甚至出现“反常”的现象。例如第四纪红黏土母质坡顶种稻土壤耕作层黏粒与 Fe_d 甚至较坡中和坡底的土壤低。因此,在今后的研究中要注意地形的影响。

4 结 论

成土母质(或土壤自身)可以决定丘陵区水耕人为土黏粒与 SOC 对人为水耕成土过程的敏感性,明显影响其演变特征。 Fe_d 对人为水耕的成土过程非常敏感,其迁移与转化主要受成土过程影响,受成土母质(或土壤自身)影响很小; Fe_1-Fe_d 在人为水耕的成土过程中相对稳定, Fe_1 的含量分布特征主要受 Fe_d 的影响。黏粒的淋失会对土壤中元素的迁移与分布产生重要影响,造成 SiO_2 相对富集, Al_2O_3 相对亏损,在利用由 Al 和 Si 两种元素计算所得到的一些指标指示丘陵区水耕人为土的发育程度时一定要慎重;而 TiO_2 在水耕人为土中相对稳定,建议作为南方丘陵区水耕人为土的稳定元素来指示其他元素的迁移率。

参 考 文 献

[1] 李庆逵. 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

[2] Pan G X, Li L Q, Wu L S, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils. *Global Change Biology*, 2003, 10(1): 79—92

[3] Pan G X, Li L Q, Zhang Q, et al. Organic carbon stock in topsoil of Jiangsu Province, China, and the recent trend of carbon sequestration. *Journal of Environmental Sciences-China*, 2005, 17: 1—7

[4] Li C S. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1/3): 259—276

[5] Pathak H, Li C S, Wassmann R. Greenhouse gas emissions from India rice fields: Calibration and upscaling using the DNDC model. *Biogeosciences*, 2005, 1: 1—11

[6] Li Z P, Velde B, Li D C. Loss of K-bearing clay minerals in flood-irrigated, rice-growing soils in Jiangxi Province, China. *Clays and Clay Minerals*, 2003, 51(1): 75—82

[7] Zhang G L, Gong Z T. Pedogenic evolution of paddy soils in dif-

ferent soil landscapes. *Geoderma*, 2003, 115: 15—29

[8] Kyuma K. *Paddy soil science*. Japan: Kyoto University Press, 2004

[9] Cheng Y Q, Yang L Z, Cao Z H, et al. Chronosequential changes of selected pedogenic properties in paddy soils as compared with non-paddy soils. *Geoderma*, 2009, 151(1/2): 31—41

[10] Chen L M, Zhang G L, Effland W R. Soil characteristic response times and pedogenic thresholds during the 1000-year evolution of a paddy soil chronosequence. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(5): 1807—1820

[11] Chadwick O A, Chorover J. The chemistry of pedogenic thresholds. *Geoderma*, 2001, 100(3/4): 321—353

[12] Brantley S L. Understanding soil time. *Science*, 2008, 321: 1454—1455

[13] Schaetzl R J, Anderson S. *Soils: Genesis and geomorphology*. New York: Cambridge University Press, 2005

[14] Han G Z, Zhang G L. Changes in magnetic properties and their pedogenetic implications for paddy soil chronosequences from different parent materials in South China. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64: 435—444

[15] 韩光中. 我国南方丘陵地区不同母质水耕人为土演变特征研究. 南京:中国科学院南京土壤研究所, 2012. Han G Z. Pedogenesis of Hydragric Anthrosols chronosequences from different parent materials in South China (In Chinese). Nanjing: Institute of Soil Science, Chinese Academy of Soil Sciences, 2012

[16] Harden J W. A quantitative index of soil development from field descriptions: Examples from a soil chronosequence in central California. *Geoderma*, 1982, 28(1): 1—28

[17] Carré F, Jacobson M. Numerical classification of soil profile data using distance metrics. *Geoderma*, 2009, 148(3/4): 336—345

[18] 龚子同,陈志诚,史学正,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, Chen Z C, Shi X Z, et al. *Chinese Soil Taxonomy: Theory, methodology, practice* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999

[19] 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(5): 317—327

[20] 南京农业大学. 土壤农化分析. 北京:中国农业出版社, 1986:153—154. Nanjing Agricultural University. *Soil and agricultural chemistry analysis* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1986: 153—154

[21] 韩光中,张甘霖,李德成. 南方丘陵区三种母质水耕人为土有机碳的累积特征与影响因素分析. *土壤*, 2013, 45(6): 978—984. Han G Z, Zhang G L, Li D C. Accumulation of soil organic carbon and their influencing factors of Hydragric Anthrosols in hilly regions of South China (In Chinese). *Soils*, 2013, 45(6): 978—984

[22] Duchaufour Ph. *Pédologie, Tome I Pédogenèse et Classification*. Paris, New York, Barcelone, Milan: Masson, 1983

[23] 陈留美. 典型水耕人为土时间序列演变特征研究. 南京:中国科学院南京土壤研究,2009. Chen L M. Pedogenesis of a typical Stagnic Anthrosols chronosequence. Nanjing: Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, 2009

INFLUENCE OF PARENT MATERIAL ON EVOLUTION OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF HYDRAGRIC ANTHROSOLS IN HILLY REGIONS OF SOUTH CHINA

Han Guangzhong^{1,2,3} Zhang Ganlin^{2,3†}

(1 College of Geography and Resources Science of Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641112, China)

(2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Chronosequence analysis done of three Hydragric Anthrosols derived from purple sand shale, quaternary red clays and red sandstone, respectively, in hilly regions of South China to explore evolutions of their basic physico-chemical properties. Results show that parent material was the major factor determining sensitivity of clay and SOC to forming processes of the soils and hence apparently evolution of their soil properties. Free iron (Fe_d) was very sensitive to the soil forming processes, and its translocation and transformation was mainly affected by the latter, rather than soil parent material. However silicate iron (Fe_t - Fe_d) was not so sensitive to soil forming processes, and the distribution of total iron (Fe_t) was affected mainly by Fe_d . Loss of clay had some important effects on migration and distribution of soil elements, causing enrichment of SiO_2 and loss of Al_2O_3 in the soils. It must, therefore, be careful in working out some indices to indicate development stages of Hydragric Anthrosols by using the two elements, Al and Si. TiO_2 was relatively stable throughout the soil forming processes and hence could be used to indicate migration rates of other major elements in the paddy soils.

Key words Hydragric Anthrosols; Chronosequence; Parent material; Evolution characteristic

(责任编辑:檀满枝)