

耕作年限对水稻土有机碳分布和腐殖质结构特征的影响*

慈恩¹ 杨林章^{1†} 程月琴¹ 施林林² 殷士学²

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏扬州 225009)

摘要 分析比较了浙江慈溪耕作年限为 50、100、500、700、1 000、2 000 a 的水稻土剖面和不同粒级复合体中有机碳的分布特征, 并利用红外光谱技术, 探讨了长期耕作对水稻土腐殖质结构和功能基团的影响。结果表明, 耕作年限在 50~2 000 a 范围内, 稻田耕作表层有机碳含量受耕作年限影响不大, 随着耕作年限的增加, 约 30~60 cm 深度土层中有机碳含量有升高趋势。稻田土壤 0~40 cm 土层和 40~80 cm 土层有机碳储量变化幅度(%)随着耕作年限的增加逐渐下降, 表明早期开垦的水稻土仍有很大的固碳潜力。100、500、1 000 a 水稻土耕作表层中, <2 μm 复合体的有机碳含量受耕作年限影响不大; 随着耕作年限延长, <2 μm 复合体有机碳分配系数不断增大, 10~50 μm 复合体有机碳分配系数则呈下降趋势。100、500、700 a 水稻土胡敏酸的芳化度随耕作年限增加有所提高, 500 和 700 a 水稻土胡敏酸的脂肪族 $-\text{CH}_2-$ 、 $-\text{CH}_3$ 基团含量要高于 100 a 水稻土, 胡敏酸的聚合程度基本上不受耕作年限影响。

关键词 耕作年限; 水稻土; 有机碳; 有机无机复合体; 红外光谱

中图分类号 S143 **文献标识码** A

土壤有机质是反映土壤肥力状况的重要指标, 影响农田生态系统的生产力, 同时有机质的分解也会对大气中 CO_2 浓度产生极大影响。可见, 土壤有机碳动态不但影响到农业生态系统的可持续发展, 也影响到大气圈和生物圈的可持续发展。

水稻土是一种人为土, 在我国分布极广, 南起海南岛的崖县, 北至黑龙江的漠河, 西起西藏, 东到台湾, 都有水稻土的分布, 主要分布在秦岭—淮河以南^[1], 是我国重要的农业土壤资源和土地利用方式。在同一区域内, 当水稻土形成过程中气候、母质、地形、生物等自然因素基本相同时, 时间和人为因素则是导致水稻土发育特征差异的主要因素; 影响水稻土发生演化的人类活动很多, 其中最重要的是土壤耕作。土壤耕作是土壤管理的主要技术措施^[2], 在耕作强度和熟制变化不大的情况下, 耕作年限成为引起水稻土发育特征差异的主导因素

之一。

有关耕作年限对土壤有机碳影响的报道很多, 但主要集中在短期耕作 (<100 a) 对土壤有机碳的影响^[3,4], 几百年直至上千年的长期耕作对稻田土壤有机碳影响的报道较少。我国种植水稻历史悠久, 浙江沿海修建海塘, 造田种稻, 有上千年的历史, 且筑塘造田的时间均有历史记载, 为研究不同耕作年限的水稻土提供了宝贵的资源。本研究充分利用这一我国特有的水稻土资源, 分析比较了有机碳在耕作年限为 50、100、500、700、1 000、2 000 a 的水稻土剖面和微团聚体粒组中的分布变化, 并利用红外光谱技术, 探讨了长期耕作对腐殖酸结构和功能基团的影响, 旨在阐明长期人为耕作对稻田有机碳在土壤中运移和转化特征的影响, 为进一步研究水稻土固碳容量、固碳机理及可持续利用性提供科学依据。

* 国家重点基础研究发展规划项目 (2005CB121108) 和自然科学基金重点项目 (40335047) 资助

† 通讯作者, E-mail: lzyang@issas.ac.cn

作者简介: 慈恩 (1981~), 男, 汉族, 安徽枞阳人, 博士研究生, 主要从事于土壤生态学研究。电话: 025-86881286,

E-mail: cien@mail.issas.ac.cn 或 cien777@sohu.com

收稿日期: 2007-04-04; 收到修改稿日期: 2007-07-15

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试水稻土采自浙江省慈溪市,发育母质均为海涂堆积物。慈溪位于东海之滨,杭州湾南岸,地处北亚热带南缘,属季风型气候,四季分明,日照充足,无霜期全年 246 d;气候温和,年平均气温 16.3 °C;降水充沛,年平均降水量 1 325 mm。该区域在 6 000 a前尚为浅海,陆地均由海涂在自然条件下沉积堆高形成。至公元 5世纪,民间随海涂地形不同开始垒土筑塘,随着海

涂淤积的北移,不断增筑海塘,至今大部分地段已筑至十塘;每筑一塘,当地人民便开始开垦,使其变为耕地^[5];而水稻则是当地长期种植的粮食作物。《慈溪县志》记载在东汉光武帝时(公元 25~57年)慈溪东部已广栽水稻。另外,各海塘修筑时间均有记载,故稻田耕作年限可根据所处地段海塘修筑年代来推算。本研究在慈溪选取 50、100、500、700、1 000、2 000 a等 6个不同耕作年限的水稻土。采样时间为 2006年 3月,样品采集时各样点稻田均处于落干状态,按剖面发生层次采取土壤剖面样品,采样深度为 100 cm,各土样的基本情况见表 1。

表 1 供试土壤的基本情况
Table 1 Information of the soils tested

耕作年限 Cultivation history (a)	层次 Layer (cm)	采样点 Sampling sites	pH	黏粒含量 Clay content (%)	耕作年限 Cultivation history (a)	层次 Layer (cm)	采样点 Sampling sites	pH	黏粒含量 Clay content (%)
50	0~13	慈溪市桥头镇	7.15	12.60	700	0~15	慈溪市周巷镇	7.62	11.99
	13~18	潭河沿村	8.26	13.12		15~20	大古塘村	7.58	11.61
	18~40		8.54	13.20		20~37		7.79	11.95
	40~56		8.32	14.60		37~63		7.64	19.00
	56~100		8.32	13.20		63~91		8.05	17.60
100	0~20	慈溪市桥头镇	7.14	13.10	91~100		8.18	18.90	
	20~63	小桥头村	8.22	15.60	1 000	0~18	慈溪市周巷镇	7.07	14.19
	63~100		8.53	15.76	18~26	南周巷村	7.94	16.08	
500	0~15	慈溪市周巷镇	7.75	10.81	26~41		8.09	18.03	
	15~19	下吴家路村	7.92	10.99	41~82		8.02	21.69	
	19~39		8.33	11.45	82~100		7.59	17.79	
	39~88		8.51	11.71	2 000	0~13	慈溪市桥头镇	4.74	18.59
	88~100		8.58	11.40	13~70	五姓村	5.63	22.20	
					70~100		4.94	15.90	

Tanheyan village of Qiaotou town, Cixi City; Xiaoqiaotou village of Qiaotou town, Cixi City; Xiaowujialu village of Zhouxiang town, Cixi City; Dagutang village of Zhouxiang town, Cixi City; Nanzhouxiang village of Zhouxiang town, Cixi City; Wuxing village of Qiaotou town, Cixi City

1.2 剖面土层有机碳储量统计方法

本研究土壤样品是按剖面发生层次采取的,同一发生层中土壤理化性质基本一致,并参照他人的工作^[6],根据各剖面不同发生层次有机碳含量进行

统计分析,得到 0~40、0~80和 40~80 cm土层有机碳储量,具体计算如下:

如求 0~X cm土层有机碳储量:

$$A_{0-X} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} C_{X_i \sim X_{i+1}} \times (X_{i+1} - X_i) \times \rho_i \times (1 - F_i) + C_{X_n \sim X_{n+1}} \times (X - X_n) \times \rho_n \times (1 - F_n)}{100} \times S \quad (1)$$

式中, A_{0-X} 为单位面积(1 m²)0~X cm土层有机碳储量(g); i 为土壤层序号($i=1, 2, \dots, n-1$), X 表示深度,单位为 cm,其中, $X_{n+1} > X > X_n > X_{n-1} > \dots > X_2 > X_1 = 0$, $(X_{i+1} - X_i)$ 为第 i 层厚度(cm); $C_{X_i \sim X_{i+1}}$ 和 $C_{X_n \sim X_{n+1}}$ 分别为第 i 层($X_i \sim X_{i+1}$ cm)和第 n 层土壤有机碳含量(g kg⁻¹); S 为面积,单位为

m²; ρ_i 和 ρ_n 为第 i 层和第 n 层土壤容重,单位为 kg m⁻³; F_i 和 F_n 分别为第 i 层和第 n 层土壤中 >2 mm石砾的比例。

$$A_{40-80} = A_{0-80} - A_{0-40} \quad (2)$$

式中, A_{40-80} 为单位面积(1 m²)40~80 cm土层有机碳储量(g)。

农田土壤 0~40 cm 和 40~80 cm 土层有机碳储量变化幅度 ():

$$= \frac{(A_{0-40} - A_{40-80})}{A_{40-80}} \times 100\% \quad (3)$$

1.3 土壤不同粒级复合体的分离:超声波振动沉降虹吸分离法^[7,8]

称取过 60 目筛的风干土样 54 g 置于 1 000 ml 高型烧杯中,加水 540 ml 使土水质量比为 1:10,用电动搅拌器 (1 000 r min⁻¹) 搅拌 1 h。再将烧杯直接放在加有冰水的槽形超声波发生器中,保持超声波清洗槽里的冰水面与烧杯中的液面接近,于 21.5 kHz 300 mA 超声分散 20 min。如分散不完全,可停机片刻,待悬液降温后,再行超声。分散完毕,将分散的土样用蒸馏水洗入 2 000 ml 高型烧杯,加水配成 3% 的悬液,以备分离土壤复合体。根据司笃克斯定律计算每个粒级复合体沉降时间,用虹吸法分别吸取 <2 μm、2~10 μm、10~50 μm 3 个粒级的复合体,各粒级提取至悬浊液在规定沉降时间内不再显浑浊为止,烧杯内残留为 >50 μm,各粒级悬液经巴氏滤管抽滤浓缩,在 40℃ 以下鼓风干燥箱中去除水分,风干后称重,磨细备用。

1.4 腐殖酸红外光谱分析^[9,10]

称取 5 g 土壤样品与 500 ml 0.1 mol L⁻¹ Na₄P₂O₇ 混合,在室温下振荡 6 h,离心 (1 400 r min⁻¹, 35 min) 分离固体残留物,并经过 0.45 μm 滤膜过滤,用 1 mol L⁻¹ HCl 将滤液调节至 pH = 2,使 HA 沉淀。12 h 后,待沉淀完全,离心分离沉淀,用蒸馏水透析胡敏酸凝胶,然后冷冻干燥。在玛瑙研钵中磨细约 200 目,置于 60℃ 真空干燥箱内干燥 2 h,装瓶密封置于硅胶干燥器内备用。称取 0.5 mg 腐殖酸样品和 80 mg 干燥过的光谱纯 KBr 粉末于玛瑙研钵中,红外灯下研磨 4~5 min (粒度小于 2 μm),然后将试样与 KBr 混合物置于硅胶干燥器中 12 h,压制腐殖酸-KBr 锭剂片和纯 KBr 锭剂片,经傅立叶变换红外分光光度计扫描测定,获得 IR 光谱。

1.5 理化性质分析方法

土壤及复合体有机碳含量:重铬酸钾容量法^[10];土壤容重:环刀法。

2 结果与讨论

2.1 水稻土有机碳剖面分布特征

土壤剖面有机质的分布状况,取决于全部成土过程的综合影响^[11],包括有机质的来源及其进入土

壤的方式等众多影响因素。通过分析不同耕作年限水稻土剖面样品有机碳含量表明 (图 1),各剖面中,耕作表层的有机碳含量均为最高,随着土层深度的增加,有机碳含量逐渐降低;不同剖面 60~70 cm 以下土层中有机碳含量均很低,约为 2 g kg⁻¹ 左右,且剖面间差异不大。有研究表明^[12],在较短的耕作年限 (30 a) 内,稻田土壤耕作层有机碳随耕作年限逐年增加,30 a 以后,土壤耕作层有机碳基本趋于稳定。比较不同耕作年限水稻土耕作表层有机碳含量 (图 1),可以看出,50~2 000 a 的耕作年限内,耕作年限对耕作表层有机碳含量影响不大,耕作表层有机碳含量并未随着耕作年限延长出现大幅度增加,短时期内进入土体的作物残体数量可能成为有机碳含量高低的主导因素。这充分表明,长期耕作的稻田土壤耕作表层有机碳含量趋于稳定,且长达 2 000 a 的耕作也不会使稻田土壤耕作表层有机碳出现明显增加的现象。

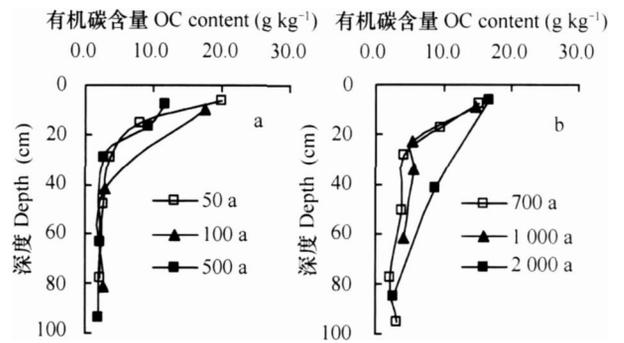


图 1 不同耕作年限水稻土有机碳剖面分布

Fig. 1 Distribution of organic carbon (OC) in profiles of paddy soils different in cultivation history

根据不同剖面有机碳随深度分布的规律不同,本文将其分为 3 类 (图 1)。从图 1a 图 1b 可以看出: (1) 50、100、500 a 水稻土有机碳剖面分布规律相似,土壤有机碳含量 (c , g kg⁻¹) 与土壤深度 (d , cm) 呈显著的对数负相关 (50 a 水稻土: $c = -7.107 \ln(d) + 30.416$, $r = -0.924$; 100 a 水稻土: $c = -7.631 \ln(d) + 34.245$, $r = -0.954$; 500 a 水稻土: $c = -4.208 \ln(d) + 19.791$, $r = -0.927$, $p < 0.05$); (2) 700 a 和 1 000 a 水稻土剖面有机碳分布相似,呈 S 形分布; (3) 2 000 a 水稻土剖面中,自上而下有机碳降低幅度相对较为平稳,有机碳含量 (c) 与土壤深度 (d) 呈显著的线性负相关 (2 000 a 水稻土: $c = -0.177d + 17.315$, $r = -0.989$, $p < 0.05$)。另外,通过比较图 1a 和图 1b,可以发现,与

50、100、500 a水稻土剖面中约 30~60 cm 深度土层相比,随着耕作年限延长,700、1 000、2 000 a水稻土剖面中,该深度土层(约 30~60 cm)有机碳有升高趋势。

2.2 水稻土剖面有机碳储量变化特征

土壤碳库储量约为大气碳库的 2 倍,土壤有机碳库储量较小幅度的降低,均会通过向大气排放温室气体而影响温室效应^[13]。本文依据不同剖面层次有机碳含量,运用式(1)统计获得不同耕作年限稻田的单位面积(1 m²)0~80 cm 土层有机碳储量(A_{0-80}) (图 2)。从图 2 可以看出, A_{0-80} 的最高值出现在 2 000 a 稻田,最低值在 500 a 稻田,50、100、700、1 000 a 稻田的有机碳储量差异不是很大。从不同耕作年限稻田 A_{0-80} 来看,在 50~1 000 a 范围内,各剖面差异不大。统计分析发现,除 2 000 a 稻田外,不同耕作年限稻田 0~20 cm 土层有机碳储量(A_{0-20})占 A_{0-80} 比重均大于 50% (图 3)。这充分表明,对于耕作年限在 1 000 a 以内的稻田来说,土壤有机碳主要集中在 0~20 cm 的耕作表层。由于耕作表层的有机碳含量受短时间内进入到土体的有机物数量影响很大,这也在一定程度上解释了在 50~1 000 a 范围内,耕作年限对稻田 0~80 cm 土体有机碳储量影响不明显的原因。

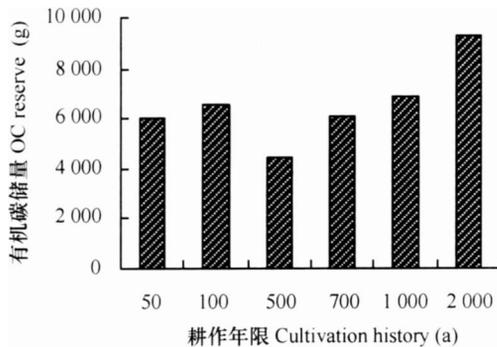


图 2 不同耕作年限稻田 0~80 cm 土层有机碳储量 (A_{0-80})

Fig. 2 OC reserve (A_{0-80}) of soil layer (0~80 cm) in paddy fields different in cultivation history

由于不同稻田土壤有机碳储量均存在一定的背景差异;另外,从局部的短时期来看,如采样的当季或前几季,进入土体的有机质含量多少就不受耕作年限影响,但从整体上看,上百年的耕作会较几十年的耕作向土体带入更多的植物残体。为此,根据式(3)计算农田土壤 0~40 cm 土层和 40~80 cm 土层有机碳储量变化幅度(),以达到尽量消除背景差异和反映长期耕作对土体有机碳空间分布的

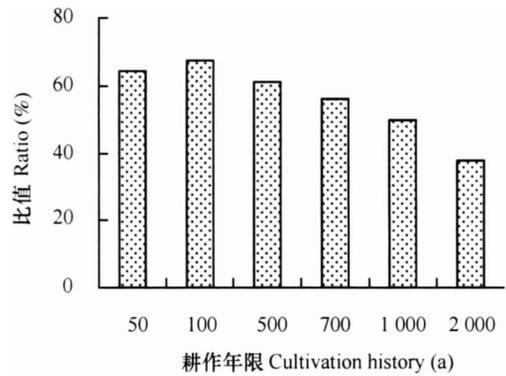


图 3 不同耕作年限稻田的 A_{0-20}/A_{0-80}

Fig. 3 Ratio of A_{0-20}/A_{0-80} in paddy fields different in cultivation history

影响。结果表明,稻田土壤 0~40 cm 土层和 40~80 cm 土层有机碳储量变化幅度()随着耕作年限(x)的增加逐渐下降(图 4),究其原因,可能是稻田土壤长期处于水分上下移动状态,会将进入到耕作层中的部分碳带到耕作层以下土层固定起来,再加上植物根系的生长,从而造成这种下层土壤有机碳储量逐渐增加的情形。这一结果表明,长期耕种(>50 a)的稻田耕层有机碳变化不大,并不能说明水稻土的固碳量没有增加,水稻土层次间有机碳储量要达到一个稳定状态需要上千年的耕作年限。另外,也表明早期开垦的水稻土仍有着很大的固碳潜力,且稻田土壤系统是一个逐渐稳定的系统。长期以来,研究表明短期种植水稻能增加土壤有机碳^[12,14~16],但对耕种长达几百年以上的水稻田的碳汇效应研究较少;然而,对于本文选材的稻田土壤,上述结果表明,虽然耕种千年以上,但其仍然具有汇效应。

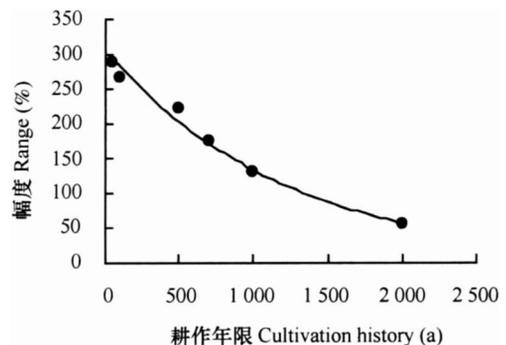


图 4 稻田土壤上(0~40 cm)下(40~80 cm)土层有机碳储量变化幅度

Fig. 4 Range of variation of soil organic carbon reserve between two soil layers, 0~40 cm and 40~80 cm in depth in paddy fields

2.3 不同复合体中有机碳的分布特征

不同粒级的土壤复合体中有机碳抗分解的能力不同,代表着不同活性的碳库^[17,18]。各粒级复合体的有机碳含量不仅反映了有机碳在土壤中的分布状况,而且也能体现出种植水稻对不同活性碳库的影响。从图5可以看出,100、500、1000 a稻田耕层土壤粒级 $<50\ \mu\text{m}$ 的复合体有机碳含量顺序由高到低均为: $<2\ \mu\text{m}$ 、 $2\sim 10\ \mu\text{m}$ 、 $10\sim 50\ \mu\text{m}$,这与徐阳春等^[19]的结果类似。虽然500、1000 a稻田耕层土壤有机碳低于100 a稻田,但三者 $<2\ \mu\text{m}$ 复合体有机碳含量差异很小,且随着耕作年限延长,含量还略有增加,其值分别为: $29.97\ \text{g kg}^{-1}$ (100 a)、 $30.58\ \text{g kg}^{-1}$ (500 a)和 $30.86\ \text{g kg}^{-1}$ (1000 a) (图5)。从上述结果可以看出, $<2\ \mu\text{m}$ 复合体有机碳属于活性很低的碳库,对于耕种上百年的水稻土来说,该部分碳库基本达到饱和,受耕作年限影响很小。随后,各土壤中 $>50\ \mu\text{m}$ 的复合体有机碳含量有所增加,这可能是受粗有机残体的影响,导致了较大微团聚体有机碳含量增加^[20]。

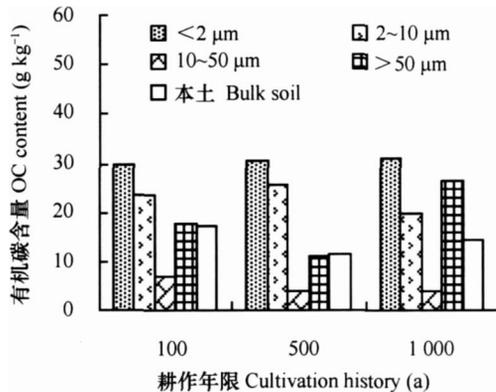


图5 稻田耕作表层不同粒级复合体有机碳含量
Fig. 5 OC content of organo-mineral complexes different in particle size in the topsoil of paddy fields

从耕层有机碳在复合体中的分配系数(即不同粒级复合体有机碳量占总有机碳量的百分比)来看(图6),在不同年限水稻土中,有机碳主要集中在 $<2\ \mu\text{m}$ 和 $2\sim 10\ \mu\text{m}$ 复合体部分, $>50\ \mu\text{m}$ 复合体有机碳分配系数最低;随着耕作年限增长,黏粒($<2\ \mu\text{m}$)复合体有机碳分配系数不断增加,而 $10\sim 50\ \mu\text{m}$ 复合体有机碳分配系数则呈下降趋势。从总体上来看,随着耕作年限增加,不同粒级组($<50\ \mu\text{m}$)复合体有机碳分配系数之间的差异逐渐加大。

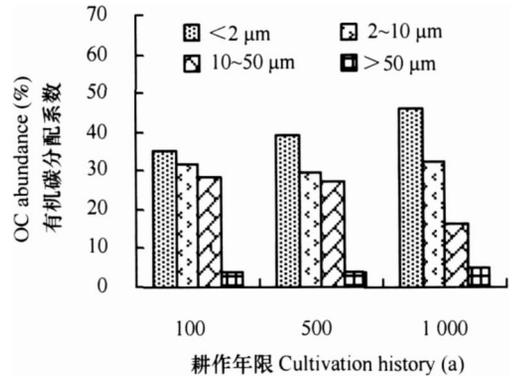


图6 稻田耕作表层不同粒级复合体中有机碳分配系数
Fig. 6 OC abundance of organo-mineral complexes different in particle size in the topsoil of paddy fields

2.4 水稻土腐殖酸红外光谱特征

腐殖酸的红外光谱能提供其分子结构和官能团等方面的信息^[21,22]。对红外光谱的分析可知,每种官能团都有固定的吸收峰^[10,23]。图7是用 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 提取的慈溪100、500、700 a稻田耕层土壤胡敏酸红外光谱图(波数—吸光率)。从光谱图中可以看出,3种土壤胡敏酸均在 3440 、 2920 、 2850 、 1640 、 1385 、 1035 、 $915\ \text{cm}^{-1}$ 等附近有特征吸收带,总体谱形比较相似,表明不同年限水稻土胡敏酸具有基本一致的结构;另外,不同土壤胡敏酸在某些特征峰的吸收强度上有明显差异,反映了耕作年限对胡敏酸的结构和官能团的含量、组成有一定影响。图7表明,胡敏酸在 $3000\sim 3600\ \text{cm}^{-1}$ 有宽吸收,表明有聚合—OH存在; $1600\sim 1650\ \text{cm}^{-1}$ 也存在较强吸收,说明有芳香结构和含 $\text{C}=\text{O}$ 的基团; $1035\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收表明不同土壤胡敏酸可能含有多糖类物质^[24](如纤维素等); $915\ \text{cm}^{-1}$ 出现了一 COOH 的 $\text{O}-\text{H}$ 面外变形振动,表明存在羧基。不同土壤胡敏酸在 $1640\ \text{cm}^{-1}$ 附近的吸收带强度不同, $700\ \text{a} > 500\ \text{a} > 100\ \text{a}$,表明随着耕作年限增加,水稻土胡敏酸的芳化度有增加趋势。从胡敏酸在 2920 、 2850 、 $1385\ \text{cm}^{-1}$ 附近的吸收带来看,500 a和700 a水稻土胡敏酸的脂肪族 $-\text{CH}_2-$ 、 $-\text{CH}_3$ 基团含量要高于100 a水稻土。另外,500 a水稻土 $-\text{CH}_2-$ 基团含量相对较高。胡敏酸在 $2500\sim 1800\ \text{cm}^{-1}$ 区域红外光谱曲线的斜度与其聚合程度呈正相关^[25],从图7可以看出,三种土壤的胡敏酸光谱曲线在这一区域内斜度基本相同,表明胡敏酸的聚合程度差异不大。

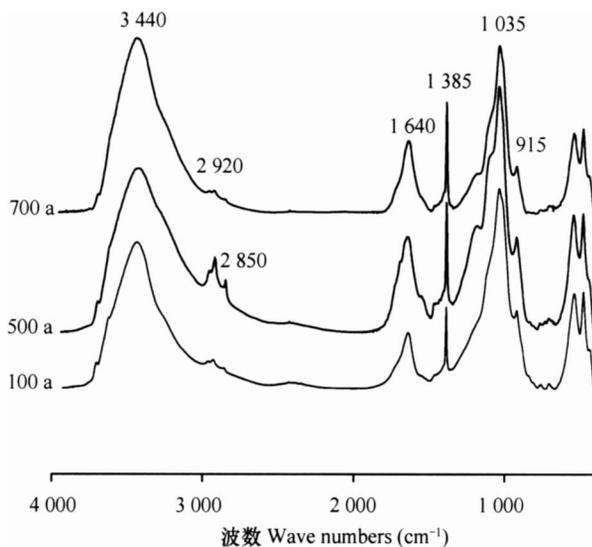


图 7 用 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 提取的水稻土胡敏酸红外光谱

Fig. 7 Infrared absorption spectra of HA extracted with $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ from paddy soils

3 结 论

1) 在耕作年限为 50 ~ 2 000 a 范围内, 相同母质稻田的耕作历史长短对耕作表层土壤有机碳含量影响不大, 但随着耕作年限的增加, 深度约 30 ~ 60 cm 稻田土层中有机碳含量有升高趋势。稻田土壤 0 ~ 40 cm 土层和 40 ~ 80 cm 土层有机碳储量变化幅度 () 随着耕作年限的增加逐渐下降, 早期开垦的水稻土仍有很大的固碳潜力。

2) 100、500、1 000 a 水稻土耕作表层中, $< 2 \mu\text{m}$ 复合体有机碳含量受耕作年限影响不大, 随着耕作年限增长, 黏粒复合体有机碳分配系数不断增加, 而 10 ~ 50 μm 复合体有机碳分配系数则呈下降趋势。

3) 100、500、700 a 水稻土胡敏酸的芳化度随耕作年限增加有所提高, 500 和 700 a 水稻土胡敏酸的脂肪族 CH_2 、 CH_3 基团含量要高于 100 a 水稻土, 胡敏酸的聚合程度基本上不受耕作年限影响。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤. 北京: 科学出版社, 1978. 465. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences ed Soils of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1978. 465
- [2] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000. 242. Huang C Y. Soil Science (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000. 242
- [3] 武天云, Schoenau J J, 李凤民, 等. 耕作对黄土高原和北美大草原三种典型农业土壤有机碳的影响. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2 213 ~ 2 218. Wu T Y, Schoenau J J, Li F M, *et al*. Influence of cultivation on organic carbon in three typical soils of China Loess Plateau and Canada Prairies (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(12): 2 213 ~ 2 218
- [4] Heenan D P, Chan K Y, Knight P G. Long-term impact of rotation, tillage and stubble management on the loss of soil organic carbon and nitrogen from a Chromic Luvisol. Soil & Tillage Research, 2004, 76: 59 ~ 68
- [5] 陆宏, 许登坤, 厉仁安, 等. 慈溪市土壤环境质量与农产品安全生产对策. 杭州: 浙江大学出版社, 2005. 9 ~ 10. Lu H, Xu D K, Li R A, *et al*. Soil Environment Quality and Countermeasure for Safety Production of Farm Produce in Cixi City (In Chinese). Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005. 9 ~ 10
- [6] 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: 79 ~ 92
- [7] 熊毅, 等编著. 土壤胶体. 第 2 册. 北京: 科学出版社, 1983. 1 ~ 67. Xiong Y, *et al* eds. Soil Colloid (In Chinese). Volume 2. Beijing: Science Press, 1983. 1 ~ 67
- [8] 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. 111 ~ 123. Lu R K. Analytical Methods of Soil and Agrochemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. 111 ~ 123
- [9] Kaiser M, Ellerbrock R H. Functional characterization of soil organic matter fractions different in solubility originating from a long-term field experiment. Geoderma, 2005, 127: 196 ~ 206
- [10] 文启孝. 土壤有机质研究法. 北京: 农业出版社, 1984. 19 ~ 38, 223 ~ 236. Wen Q X. The Method of Soil Organic Matter (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1984. 19 ~ 38, 223 ~ 236
- [11] 马毅杰, 陈家坊. 水稻土物质变化与生态环境. 北京: 科学出版社, 1999. 8 ~ 18. Ma Y J, Chen J F. Change in Paddy Soil Materials and Its Effect on Eco-environment (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999. 8 ~ 18
- [12] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云, 等. 红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析. 土壤学报, 2003, 40(3): 344 ~ 352. Li Z P, Zhang T L, Chen B Y, *et al*. Soil organic matter dynamics in a cultivation chronosequence of paddy fields in subtropical China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(3): 344 ~ 352
- [13] 金峰, 杨浩, 蔡祖聪, 等. 土壤有机碳密度及储量的统计研究. 土壤学报, 2001, 38(4): 522 ~ 528. Jin F, Yang H, Cai Z C, *et al*. Calculation of density and reserve of organic carbon in soils (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(4): 522 ~ 528
- [14] 许信旺, 潘根兴. 中国水稻土碳循环研究进展. 生态环境, 2005, 14(6): 961 ~ 966. Xu X W, Pan G X. The progress in the carbon cycle researches in paddy soil in China (In Chinese). Ecology and Environment, 2005, 14(6): 961 ~ 966
- [15] 黄运湘, 王改兰, 冯跃华, 等. 长期定位试验条件下红壤性水稻土有机质的变化. 土壤通报, 2005, 36(2): 181 ~ 184. Huang Y X, Wang G L, Feng Y H, *et al*. Changes of organic matter in paddy soil derived from red soil in a long-term located experiment

- (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36 (2): 181 ~ 184
- [16] 黄耀, 孙文娟. 近 20 年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势. 科学通报, 2006, 51 (7): 750 ~ 763. Huang Y, Sun W J. Changes in top soil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 2006, 51 (7): 750 ~ 763
- [17] Chistensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. Euro J. Soil Sci., 2001, 52: 345 ~ 353
- [18] Tiessen H, Stewart J W B. Particle-size fractions and their use in studies of soil organic matter. Cultivation effects on organic matter composition in size fractions. Soil Sci Soc Am. J., 1983, 47: 509 ~ 514
- [19] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中 C、N、P 含量与分配的影响. 中国农业科学, 2000, 35 (5): 65 ~ 71. Xu Y C, Shen Q R. Influence of long-term application of manure on the contents and distribution of organic C, total N and P in soil particle-sizes (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2000, 35 (5): 65 ~ 71
- [20] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土微团聚体有机碳汇的影响. 生态学报, 2004, 24 (12): 2 961 ~ 2 965. Yuan Y H, Li H X, Huang Q R, *et al* Effects of different fertilization on soil organic carbon distribution and storage in micro-aggregates of red paddy top soil (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (12): 2 961 ~ 2 965
- [21] Baglieri A, Ippob A, Negre M, *et al* A method for isolating soil organic matter after the extraction of humic and fulvic acids. Organic Geochemistry, 2007, 38: 140 ~ 150
- [22] 牛灵安, 郝晋珉, 李吉进. 盐渍土熟化过程中腐殖质特性的研究. 土壤学报, 2001, 38 (1): 114 ~ 122. Niu L A, Hao J M, Li J J. Characteristics of humus in maturing salt-affected soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2001, 38 (1): 114 ~ 122
- [23] 吴景贵, 席时权, 姜岩. 红外光谱在土壤有机质研究中的应用. 光谱学与光谱化学, 1998, 18 (1): 52 ~ 57. Wu J G, Xi S Q, Jiang Y. Infrared spectroscopy application in soil organic matter (In Chinese). Spectroscopy and Spectral Analysis, 1998, 18 (1): 52 ~ 57
- [24] 张奇春, 王光火. 施用化肥对土壤腐殖质结构特征的影响. 土壤学报, 2006, 43 (4): 617 ~ 623. Zhang Q C, Wang G H. Effect of chemical fertilizer on structure of soil humus (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43 (4): 617 ~ 623
- [25] Satoh T. Organo-mineral complex status in soils. I. Thermal analytical characteristic of humus in the soils. Soil Sci Plant Nutr., 1984, 30 (1): 1 ~ 12

EFFECT OF CULTIVATION HISTORY ON DISTRIBUTION OF ORGANIC CARBON AND STRUCTURE OF HUMUS IN PADDY SOILS

Ci En¹ Yang Linzhang^{1†} Cheng Yueqin¹ Shi Linlin² Yin Shixue²

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract Distribution of organic carbon was studied in soil profiles and organo-mineral complex, different in particle size, sampled from paddy fields varying in cultivation history, 50, 100, 500, 700, 1 000 and 2 000 years in Cixi City, Zhejiang Province. Effect of long-term cultivation on structure and functional groups of humus in paddy soils was explored with the aid of infrared spectrum (IR). It seemed that cultivation history did not have much effect on organic carbon content in top soil of the paddy fields. Organic carbon content of the soil layers, 30 to 60 cm in depth increased gradually with the cultivation history, but the range () of the variation of soil organic carbon reserves between two paddy soil layers, 0 ~ 40 cm and 40 ~ 80 cm in depth respectively, decreased gradually. The findings show that paddy soils cultivated long ago still demonstrated a great potential for carbon sequestration. In the top soil of paddy fields cultivated for 100, 500 and 1 000 years, respectively, cultivation history had no significant effect on organic carbon content in organo-mineral complexes < 2 μm in particle size, while the abundance of organic carbon increased steadily in clay complex < 2 μm in particle size and declined in clay complexes, 10 ~ 50 μm in particle size with cultivation history. Aromatization of humic acid in paddy soils cultivated for 100, 500 and 700 years was enhanced with cultivation history. Aliphatic methylene (—CH₂—) and methyl (—CH₃) content of humic acid in paddy soils cultivated for 500 and 700 years was higher than in paddy soil cultivated for 100 years, and cultivation history had no effect on the extent of polymerization of humic acid.

Key words Cultivation history; Paddy soil; Organic carbon; Organo-mineral complex; Infrared spectrum