

开垦年限对稻田土壤腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响^{*}

刘 鑫 窦 森 李长龙 王培宇

(吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘 要 以吉林省磐石市朝阳山镇青山村开垦年限分别为 5 a、20 a 和 50 a 的稻田土壤为研究对象, 研究了 0~15 cm 和 15~30 cm 土层的土壤有机碳含量 (SOC)、水溶性物质 (WSS)、富里酸 (FA)、胡敏酸 (HA) 和胡敏素 (Hu) 组成和 HA 结构特征及土壤养分含量的变化。结果表明: 随稻田开垦年限增加 (5~50 a), 表层 (0~15 cm) 与亚表层 (15~30 cm) 土壤变化如下: (1) 电导率分别增加 74.8% 和 113.7%, pH 均基本稳定。土壤速效氮、有效磷和速效钾含量分别增加 0.24%、15.8%、29.7% 和 1.33%、6.92%、14.7%。(2) 有机碳总量分别增加 42.1% 和 47.9%, WSS、HA 和 Hu 含量分别增加 28.4%、51.9%、76.2% 和 87.7%、84.9%、70.1%, 而 FA 含量分别下降了 9.2% 和 1.74%。说明稻田耕作年限越长越有利于土壤有机碳的积累。(3) 胡敏酸占腐殖质的比例 (PQ) 值均增大, 土壤腐殖化程度加深。(4) HA 的氢碳元素物质的量之比 (H/C)、色调系数 (ΔLgK)、半定量分析得红外光谱在 2 920 和 1 720 峰处吸收强度之比 ($E_{2\ 920}/E_{1\ 720}$) 与在 2 920 和 1 620 峰处吸收强度之比 ($E_{2\ 920}/E_{1\ 620}$) 均减小, HA 分子芳化度增强, 缩合度上升, 结构变得复杂。

关键词 开垦年限; 稻田; 土壤有机质; 腐殖质组成; 胡敏酸; 结构特征

中图分类号 S153 **文献标识码** A

种植水稻等水生植物的水田, 又称为稻田, 和一般稻田不同, 它有田埂, 可以蓄水^[1]。土壤有机质是土壤中的各种动植物残体在土壤生物的作用下形成的一类特殊的高分子化合物。土壤有机质是土壤的重要组成部分, 在土壤肥力、环境保护、农业可持续发展等方面均起着极其重要的作用^[2]。我国南方的稻田主要为水稻土, 不仅开垦历史悠久而且幅员辽阔, 国内外对其研究较早也较多。对于北方稻田土壤的研究较少。其中张雯辉等^[3]对吉林盐碱土稻田区土壤有机碳含量变化进行研究, 以空间代替时间的采样方式, 集中采集了 6 个不同开发年份稻田土壤样品, 以重铬酸

钾-浓硫酸法测试其有机碳含量并进行对比分析。结果表明: 稻田土壤有机碳含量随开发年份的增加而增加, 土壤有机碳含量的纵向分布呈自上而下逐层减少的趋势, 且土壤有机碳含量的增加速度随着开发年限的增加逐渐减少, 土壤有机碳含量在稻田开发 57 a 后逐渐趋于稳定。胡君利等^[4]对浙江慈溪不同利用年限水稻土肥力特征进行比较, 结果表明: 利用年限较长水稻土上种植的水稻植株相对较高, 水稻秸秆、根系及谷粒的生物量均随水稻土利用年限延长而显著增加; 氮、磷、钾等营养元素在植株不同部位的分异状况不同, 其中秸秆的全磷和全钾含量均随水稻土利用年限延长而显

^{*} 国家重点基础研究发展计划 (“973”) 项目 (2011CB100503) 和吉林省重点科技攻关项目 (20130206018NY) 资助
Supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2011CB100503) and the Key Scientific and Technological Project in Jilin Province (No. 20130206018NY)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: dousen1959@126.com

作者简介: 刘鑫 (1988—), 女, 硕士研究生, 从事土壤环境与生物化学研究。E-mail: 809214788@qq.com

收稿日期: 2015-03-16; 收到修改稿日期: 2015-05-26

著升高,而米粒的全氮含量也趋于升高。对于稻田不同开垦年限土壤具体各腐殖质组分变化少有研究。

水稻是我国最主要的粮食作物,我国粮食生产总量的大部分来自于东北地区。东北地区稻田面积总数虽然现已超过667亿 hm^2 (其中黑龙江省达到533亿 hm^2 ,吉林与辽宁省各为66亿 hm^2),且在全国水稻面积中占有重要地位,但是稻田开垦年限短且大多由旱田转变而来,并且一部分转变的稻田由于水利设施的不完备又再次改回旱田。在这种不规律的转变过程中,稻田土壤的碳固定能力、土壤肥力和 CO_2 的排放情况等如何演变,国内外对此研究较少,所以对东北地区稻田土壤的研究有重大意义。水稻产量主要取决于土壤肥力,土壤有机质是土壤肥力的重要组成成分,土壤腐殖质又是土壤固相物质的重要组成部分,对土壤肥力的发生和发展起着巨大作用^[5-8],也是衡量土壤肥力的重要指标。它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^[9]。了解稻田土壤有机质含量及组成变化,对于充分利用土地资源、实现作物的优质生产、增加粮食产量以及环境友好有重要作用^[10]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

采样点为吉林省磐石市朝阳山镇青山村,位于吉林省东南部,地处松辽平原向长白山过渡地带,属于丘陵半山区,气候为温带大陆性季风气候。年均气温 $4.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量676.5 mm,年均日照2 491 h,无霜期约125 d。土壤类型为暗棕壤型水稻土。土壤基本性质如下:有机碳含量 $10.36\sim 22.54\text{ g kg}^{-1}$,pH 5.40~5.91,电导率 $0.101\sim 0.295\text{ mS cm}^{-1}$,速效氮、有效磷和速效钾含量分别为 $42.3\sim 117.5$ 、 $15.3\sim 31.0$ 和 $46.5\sim 111.0\text{ mg kg}^{-1}$ 。土壤的基本情况见表1。

表1 不同开垦年限稻田土壤基本情况

Table 1 Basic situations of the studied paddy fields different in cultivation history

开垦年限 Cultivation history (a)	地理位置 Geographical location	海拔高度 Altitude (m)	周围情况 Surrounding
5	E 125° 41' 22" , N43° 02' 39"	H391	稻田
20	E 125° 41' 20" , N43° 01' 24"	H391	玉米地与稻田
50	E125° 36' 21" , N43° 03' 09"	H392	稻田

1.2 试验方法

选择开垦年限分别为5 a、20 a、50 a的稻田为研究对象。各采样点近几年水稻品种均为“庆林518”,每年五月初开始插秧,常规管理,施肥情况基本一致。2014年5月2日进行土壤样品采集,选择相邻3个田块(共用田埂)作为重复,每个田块随机选取3个样点,混合为一个样品。采样深度为0~15 cm、15~30 cm。土样带回实验室自然风干,过2 mm、0.25 mm筛备用。

1.3 项目分析与测定

土壤中水溶性物质(WSS)、胡敏酸(HA)、富里酸(FA)和胡敏素(Hu)用腐殖质组成修改法^[11]提取。称取过0.25 mm筛的风干土壤5 g于离心管中,加入50 ml蒸馏水并搅拌均匀,于 $(70\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴振荡器中振荡提取1

h,离心所得到的上清液为WSS,向离心管中加入30 ml $0.1\text{ mol L}^{-1}\text{ NaOH}+\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 混合液, $(70\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴振荡提取1 h,离心所得的上清液为腐殖物质(HE),用 $0.5\text{ mol L}^{-1}\text{ H}_2\text{SO}_4$ 调节pH为1.0~1.5, $(70\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴锅中保温1~2 h,静置过夜后,上清液为FA,沉淀为HA,离心管中的残渣即为粗Hu。

HA的提取和纯化采用IHSS定性提取法^[12]。称取2 mm筛土样100 g于2 500 ml玻璃瓶中,加入 1 mol L^{-1} 的HCl使pH为1~2,放置1 h,用 0.1 mol L^{-1} 的HCl调至最终土水比1:10,摇动玻璃瓶1 h,低速离心,弃去上清液,用 1 mol L^{-1} 的NaOH中和离心后沉淀(pH=7),放置1 h,用 0.1 mol L^{-1} 的NaOH将沉淀冲至玻璃瓶中,并调至最终土水比1:10,瓶中充入氮气,第二日低

速离心，所得上清液即为腐殖物质（HE），用6 mol L⁻¹的HCl调至HE的pH=1.0，放置12~16 h。低速离心后弃去上清液，所得沉淀为HA。用0.1 mol L⁻¹的KOH溶解HA并加入固体KCl，使K⁺浓度为0.3 mol L⁻¹，静置1h后，高速离心，保留上清液。用6 mol L⁻¹HCl调节上清液pH=1.0，放置12~16 h，高速离心后弃掉上清液。用30 ml的HCl（0.1 mol L⁻¹）+HF（0.3 mol L⁻¹）浸泡HA除去矿物质后经过电渗析、浓缩、冻干等过程后得到HA干样。

土壤pH和电导率分别采用电位计和电导率仪测定，土水比为1：2.5。速效氮采用碱解扩散法；有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法；速效钾采用醋酸铵浸提—火焰光度计法^[13]。

土壤及胡敏素有机碳采用重铬酸钾外加热法；HA、FA、WSS中的有机碳采用岛津TOC-VCPH仪测定。HA的元素组成采用德国产Vario EL型元素分析仪测定，红外光谱用KBr压片法^[14]在美国NICOLET-AV360型红外光谱仪上测定，扫描模式为4 000~400 cm⁻¹，并对相应的吸收峰进行半定量分析。

1.4 数据处理

PQ（胡敏酸占腐殖质的比例）值为HA中有机碳含量与HA和FA中有机碳含量之和的比值；H/C

值为HA中氢元素与碳元素物质的量之比；ΔLgK值为腐殖物质溶液在波长400 nm和600 nm处吸光值对数之差。

用Excel 2007对数据进行分析和作图，用SPSS软件中LSD法进行显著性差异分析。

2 结果与讨论

2.1 不同开垦年限稻田土壤基本理化性质的变化

不同开垦年限稻田土壤基本理化性质见表2。由表2可见，随开垦年限增加，表层土壤（0~15 cm）的pH由开垦5 a时的5.79显著下降至开垦20 a时的5.49，电导率在开垦5 a至20 a间差异性不显著，而由开垦20 a的0.187 mS cm⁻¹显著上升至开垦50 a时的0.360 mS cm⁻¹。亚表层土壤（15~30 cm）pH呈先下降后上升趋势且差异性显著，电导率变化规律同表层。稻田开垦5~50 a，土壤pH和电导率均上升。土壤pH变化可能是由于在开垦初期随着土壤氮肥得施入使pH值下降，在开垦后期由于长期淹水导致铁锰氧化物的还原消耗了质子（H⁺），使土壤酸度降低，土壤pH上升^[15]。土壤电导率是土壤盐渍化的指标，它的变化与土地利用方式发生变化（旱改水）有关^[16]。

表2 不同开垦年限稻田土壤基本理化性质的变化

Table 2 Basic physico-chemical soil properties of the paddy fields different in cultivation history

开垦年限	采集深度		电导率	速效氮	有效磷	速效钾
Cultivation history	Depth	pH	Electrical conductivity	Readily available N	Available P	Readily available K
(a)	(cm)		(mS cm ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)
5	0 ~ 15	5.79 ± 0.10bc	0.206 ± 0.005c	106.5 ± 4.0ab	42.1 ± 3.1bc	22.7 ± 1.9d
	15 ~ 30	5.89 ± 0.11ab	0.153 ± 0.008d	105.6 ± 1.9b	34.7 ± 3.4d	34.6 ± 3.7bc
20	0 ~ 15	5.67 ± 0.10cd	0.187 ± 0.009c	84.7 ± 3.4c	45.7 ± 3.2b	32.9 ± 1.9c
	15 ~ 30	5.80 ± 0.11bc	0.149 ± 0.005d	81.9 ± 1.5c	36.1 ± 3.2cd	38.0 ± 1.9ab
50	0 ~ 15	5.49 ± 0.11d	0.360 ± 0.030a	112.7 ± 5.5a	51.8 ± 4.2a	34.6 ± 1.4bc
	15 ~ 30	6.09 ± 0.14a	0.327 ± 0.022b	107.0 ± 8.9ab	37.1 ± 2.7cd	39.7 ± 1.4a

注：平均值±标准差。同一列中无相同小写字母代表差异显著，*p*<0.05。下同Note: Means±standard deviation. Different lowercase letters in the same column represent significant difference, *p*<0.05. The same below

由表2可见，随着开垦年限的增加，表层（0~15 cm）土壤速效氮含量由开垦5 a时的106.5 mg kg⁻¹减少至开垦20 a时的84.7 mg kg⁻¹，在开垦50 a时又上升至112.7 mg kg⁻¹且差异性显著；有效

磷和速效钾的含量均显著增加。亚表层（15~30 cm）土壤速效氮、有效磷和速效钾的含量变化规律同表层相同。稻田开垦5~50 a，土壤速效氮、有效磷和速效钾含量分别增加了0.24%、15.8%、

29.7%。其原因可能是稻田土壤在开垦初期对氮的需求较大，在开垦的后期随着土壤中矿物质的分解和化肥的施入使速效养分含量升高^[17]。

2.2 不同开垦年限稻田土壤有机质及腐殖质组成的变化

不同开垦年限稻田土壤及其腐殖质组分的有机碳含量见表3。由表可见，土壤的腐殖质组分以Hu为主，有机碳总量占土壤全碳的70%以上，其次为HA与FA组分共占20%左右，WSS含量最少约占1%。随着开垦年限的增加，表层（0~15 cm）土壤有机碳含量由开垦5 a时的14.11 g kg⁻¹显著上升至开垦20 a时的19.83 g kg⁻¹，在开垦20 a至50 a间差异不显著；WSS含量、FA含量；HA含量在开垦5 a至50 a间差异均不显著；Hu含量由开垦5 a时的6.8 g kg⁻¹显著上升至开垦20 a时的11.5 g kg⁻¹，在开垦20 a至50 a间差异性不显著。亚表层（15~30cm）土壤有机碳以及各腐殖质组分含量

变化规律同表层相同。稻田开垦5~50 a，WSS、HA、Hu含量分别增加45.1%、22.1%、69.8%、73.1%，FA含量下降11.0%，这可能是由于稻田由旱田改变而来，土壤在开垦初期有机碳含量较低，开垦一段时间后，土壤的植被类型有所改变，输入土壤中的有机碳量增加，同时耕垦改变了土壤环境的状态，为微生物提供了更为适宜的温度和湿度条件，从而使土壤有机碳分解速率增强，土壤的有机碳含量上升^[18-20]。一方面，实验中腐殖质各组分（WSS、HA、FA和Hu）有机碳含量之和与土壤总有机碳量基本平衡（占83%~92%），说明测定误差较小。另一方面，稻田开垦50 a与5 a相比，土壤总有机碳增加量约6.6 g kg⁻¹，腐殖质组分WSS、FA、HA和Hu增加量分别为0.08、-0.16、1.41和5.02 g kg⁻¹，总增量为6.35 g kg⁻¹，占总有机碳增量的96%，说明测定误差较小。

表3 不同开垦年限稻田土壤及其腐殖质组分有机碳含量

Table 3 Organic carbon contents in the soil and various fractions of soil humus in paddy fields different in cultivation history						
开垦年限 Cultivation history (a)	采集深度 Depth (cm)	有机碳Organic carbon (g kg ⁻¹)				
		原土 Soil	水溶性物质 Water-soluble substances	富里酸 Fulvic acid	胡敏酸 Humic acid	胡敏素 Humins
5	0~15	14.11±1.52b	0.134±0.074a	2.893±0.428a	2.225±0.494b	6.842±1.193b
	15~30	14.90±0.66b	0.138±0.056a	3.161±0.470a	2.609±0.577b	7.159±1.774b
20	0~15	19.83±1.86a	0.143±0.093a	3.084±0.089a	2.460±0.338b	11.46±0.83a
	15~30	21.00±1.92a	0.144±0.039a	3.204±1.838a	2.630±1.251b	11.51±0.20a
50	0~15	20.05±1.22a	0.172±0.094a	2.628±0.547a	3.381±0.053b	12.06±2.67a
	15~30	22.03±2.12a	0.259±0.094a	3.106±0.323a	4.825±0.743a	12.18±3.10a

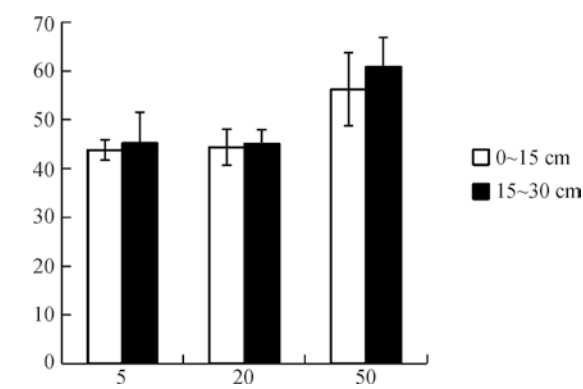
2.3 不同开垦年限稻田土壤PQ值的变化

PQ 值为HA在腐殖酸（HA+FA）中的比例，是衡量土壤腐殖质品质优劣的一个重要指标，比值越大，HA含量越高，分子量增大、分子结构越复杂，品质越好^[21]。图1为不同开垦年限稻田土壤PQ值的变化，从图中可以看出：随着开垦年限的增加，表层（0~15 cm）土壤的PQ值在开垦5 a至20 a之间差异不显著，在开垦20 a至50 a间增大且差异显著。亚表层（15~30 cm）土壤的PQ值变化规律与表层相同。稻田开垦5~50 a，土壤PQ值增大，在开垦50 a时土壤腐殖化程度最高，随着开垦年限增加HA的形成速率大于FA，土壤可提取的腐

殖酸中HA比例上升，土壤腐殖化程度升高。这可能与稻田土壤长期处于水淹的状态，与空气接触少，土壤腐殖质长期积累有关^[22]。

2.4 不同开垦年限稻田土壤腐殖质组分ΔLgK值的变化

ΔLgK值是分子结构简单与复杂变化程度的指标^[23]。表4为不同开垦年限稻田土壤腐殖质组分的ΔLgK值变化。由表可见，随着开垦年限的增加，表层（0~15 cm）WSS的ΔLgK值由开垦5 a时的0.675下降至开垦20 a时的0.496，开垦50 a时又上升至0.580且差异性显著；FA的ΔLgK值由开垦5 a时的1.194上升至开垦20 a时的1.230，开垦50 a



注：同一土层深度小写字母不同代表差异显著， $p < 0.05$ 。下同
Note: Different lowercase letters of the same soil depth in the graph represent differences at the $p < 0.05$ significance level. The same below

图1 不同开垦年限稻田PQ值的变化

Fig. 1 PQ of the paddy soil as a function of cultivation history

时下降至0.907且差异性较显著；HA的 ΔLgK 值在开垦5 a至50 a间差异性不显著。亚表层（15 ~ 30 cm）WSS的 ΔLgK 值先减小后增大且差异显著；FA的 ΔLgK 值在开垦5 a至20 a间差异性不显著，由开垦20 a时的1.120下降至开垦50 a时的0.895且差异性显著；HA的 ΔLgK 值在开垦5 a至50 a间差异性不显著。稻田开垦5 ~ 50 a，WSS的 ΔLgK 值增加、FA和HA的 ΔLgK 值减小。这是由于各腐殖质组分的分子结构随着开垦年限变化而变化所引起的^[24]。

2.5 不同开垦年限稻田土壤胡敏酸元素组成的变化
元素组成分析是判断腐殖质结构和性质最简单、最重要的方法之一。H/C和O/C是表征HA缩合度和氧化程度的指标。通过对元素的分析，可以简单的判断腐殖质可能的组成与结构^[25]。表5

表4 不同开垦年限稻田土壤 ΔLgK 值

Table 4 ΔLgK of paddy soils different in cultivation history

开垦年限 Cultivation history (a)	采集深度 Depth (cm)	ΔLgK		
		水溶性物质 Water-soluble substances	富里酸 Fulvic acid	胡敏酸 Humic acid
5	0 ~ 15	0.675 ± 0.059a	1.194 ± 0.149ab	0.645 ± 0.080a
	15 ~ 30	0.508 ± 0.024bcd	1.043 ± 0.165ab	0.610 ± 0.074a
20	0 ~ 15	0.496 ± 0.010cd	1.230 ± 0.296a	0.634 ± 0.010a
	15 ~ 30	0.482 ± 0.014d	1.120 ± 0.121ab	0.605 ± 0.011a
50	0 ~ 15	0.580 ± 0.070b	0.907 ± 0.091ab	0.617 ± 0.008a
	15 ~ 30	0.568 ± 0.041bc	0.895 ± 0.086b	0.601 ± 0.013a

表5 不同开垦年限稻田土壤HA元素组成的变化

Table 5 Elemental composition of HA in paddy soils different in cultivation history

开垦年限 Cultivation history (a)	采集深度 Depth (cm)	C (g kg ⁻¹)	H (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	O (g kg ⁻¹)	C/N	H/C	O/C
5	0 ~ 15	51.96	3.726	4.389	31.99	13.81	0.861	0.462
	15 ~ 30	53.95	3.856	4.123	29.75	15.26	0.858	0.414
20	0 ~ 15	50.73	3.528	4.272	32.73	13.86	0.835	0.484
	15 ~ 30	53.57	3.809	3.983	30.00	15.69	0.853	0.420
50	0 ~ 15	51.00	3.527	3.982	33.02	14.94	0.830	0.486
	15 ~ 30	53.58	3.611	3.672	30.39	17.02	0.809	0.425

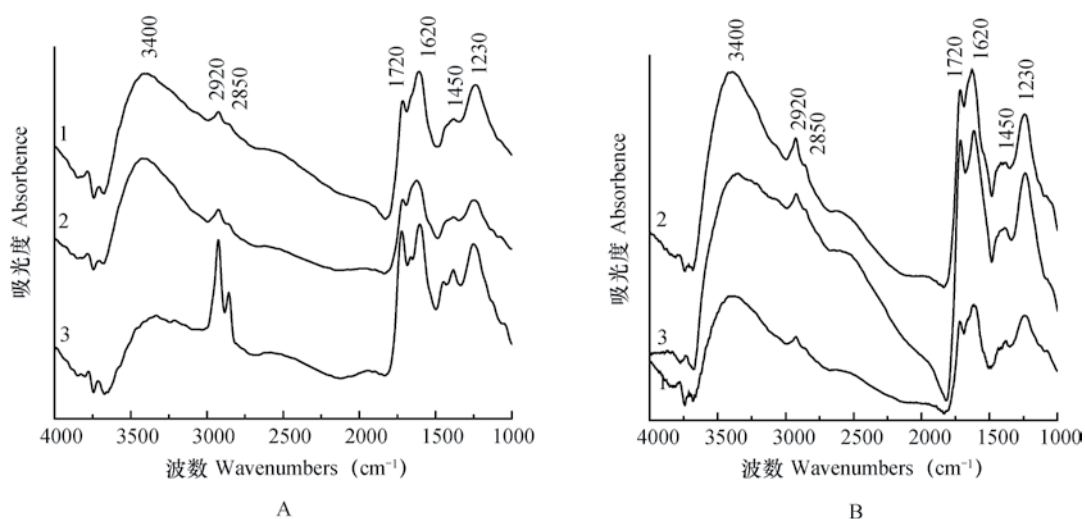
为不同开垦年限稻田土壤中HA元素组成的变化,可以看出HA的元素组成以碳为主,其次为氧。随着开垦年限的增加,表层(0~15 cm)与亚表层(15~30 cm)土壤HA的H/C均呈减小的趋势,O/C呈增大的趋势。稻田开垦5~50 a,土壤HA的H/C减小,O/C增大。说明随着开垦年限的增加,HA的缩合度和氧化度是增大的,分子结构向复杂化发展。进一步说明了HA的脂肪族的成分向增加的方向变化,稳定性增强^[26]。

2.6 不同开垦年限稻田土壤胡敏酸红外光谱的变化

土壤胡敏酸红外光谱的变化反应了HA相应的

结构单元和官能团变化。从图2看出HA的IR图谱具有相似的特征,说明不同开垦年限稻田土壤表层(0~15 cm)和亚表层(15~30 cm)HA分别具有基本一致的结构。而在某些特征峰吸收强度上有不同程度的差异,说明了HA相应的结构单元和官能团的数量有变化。随着开垦年限的增加,表层与亚表层的HA在2 920、2 850、1 720、1 620 cm⁻¹等处振动发生变化,说明HA脂肪族中的CH₂伸展、脂肪族C—H伸展、羧基的C=O伸缩振动作用、芳香C=C伸展振动等发生变化^[27]。

从半定量积分表6中我们可以看出稻田开垦



注：图A、B分别代表不同开垦年限稻田表层(0~15 cm)与亚表层(15~30 cm)土壤HA的红外光谱(IR)图,1、2、3代表开垦年限分别为5 a、20 a、50 a的红外光谱 Note: Letter A and B represents IR of the HA in the topsoil (0~15 cm) and subsoil (15~30 cm), respectively, as a function of cultivation history, and 1, 2 and 3 represents, respectively, 5 a, 20 a and 50 a in cultivation history

图2 不同开垦年限稻田土壤HA的红外光谱

Fig. 2 IR spectrum of the HA in the paddy soils different in cultivation history

表6 不同开垦年限稻田土壤HA的IR光谱主要吸收峰的相对强度(半定量)

Table 6 Relative intensities of the main absorption peaks in IR spectrum of HA (Semi-quantitative) in soils different in cultivation history											
开垦年限 Cultivation history (a)	采集深度 Depth (cm)	3 400 (cm ⁻¹)	2 920 (cm ⁻¹)	2 850 (cm ⁻¹)	1 720 (cm ⁻¹)	1 620 (cm ⁻¹)	1 450 (cm ⁻¹)	1 230 (cm ⁻¹)	2 920/2 850	2 920/1 720	2 920/1 620
5	0~15	39.35	2.85	0.58	2.31	3.88	1.23	6.99	4.914	1.234	0.735
	15~30	38.44	0.72	0.19	2.16	5.85	1.20	5.52	3.789	0.333	0.123
20	0~15	37.74	1.04	0.21	0.90	1.64	1.07	3.24	4.952	1.156	0.634
	15~30	75.13	1.15	0.24	4.96	9.56	2.20	10.47	4.792	0.232	0.120
50	0~15	14.20	4.97	1.33	4.71	8.36	0.49	6.56	3.737	1.055	0.594
	15~30	68.18	1.30	0.34	8.60	11.7	3.35	15.73	3.824	0.151	0.111

5~50 a, 随着开垦年限的增加, 稻田表层与亚表层土壤的E2 920/1 720、E2 920/1 620值均呈减小的趋势, 说明HA的芳化度增大, 即分子结构向复杂化发展。

3 结 论

随稻田开垦年限增加(5~50 a), 表层与亚表层土壤均呈以下规律: (1) pH基本稳定(5.8~6.0); 电导率、速效养分含量均提高。(2) 有机碳总量、水溶性物质、胡敏酸、胡敏素含量均增加; 富里酸含量下降。(3) 腐殖质的PQ值增大, 腐殖化程度加深。(4) HA分子缩合度上升, 芳化度增大, 结构向复杂化发展。

参 考 文 献

- [1] 曾雄生. 水田: 一个被误读的概念. 中国农史, 2012 (4): 109—117
Zeng X S. Shuitian (water field): A misunderstanding concept (In Chinese). Agricultural History of China, 2012 (4): 109—117
- [2] 钟敏, 庄舜尧. 古水稻土有机质及有机氮研究进展. 中国农学通报, 2011, 27 (15): 12—15
Zhong M, Zhuang S Y. Advances of organic matter and nitrogen study in ancient paddy soils (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27 (15): 12—15
- [3] 张雯辉. 吉林前郭盐碱水田区土壤有机碳含量变化和温室气体排放规律研究. 长春: 吉林大学, 2013: 17—25
Zhang W H. Changes of soil organic carbon content and greenhouse gas emissions in the former Jilin (In Chinese). Changchun: Jilin University, 2013: 17—25
- [4] 胡君利, 林先贵, 尹睿, 等. 浙江慈溪不同利用年限水稻土肥力特征的比较. 植物营养与肥料学报, 2008, 14 (4): 673—677
Hu J L, Lin X G, Yin R, et al. Comparison of fertility characteristics in paddy soils of different ages in Cixi, Zhejiang (In Chinese). Journal of plant nutrition and fertilizer, 2008, 14 (4): 673—677
- [5] Caldwell B A, Griffiths R P, Sollins P. Soil enzyme response to vegetation disturbance in two lowland Costa Rican soils. Soil Biology & Biochemistry, 1999, 31 (12): 1603—1608
- [6] 郭晓利. 谈谈土壤有机质的成分和在土壤肥力上的作用. 内蒙古草业, 2013, 25 (1): 19—20
Guo X L. Composition of soil organic matter and the action on soil fertility (In Chinese). Inner Mongolia Prataculture, 2013, 25 (1): 19—20
- [7] 王树涛, 门明新, 刘微, 等. 农田土壤固碳作用对温室气体减排的影响. 生态环境, 2007, 16 (6): 1775—1783
Yu S T, Men M X, Liu W, et al. Effects of carbon sequestration in farmland ecosystem on the greenhouse gas emission (In Chinese). Ecology and Environment, 2007, 16 (6): 1775—1783
- [8] Jae-Hyung Ahn, Min-Young Choi. Effects of water-saving irrigation on emissions of greenhouse gases and prokaryotic communities in rice paddy soil. Microbial Ecology, 2014, 68 (2): 271—283
- [9] 辛刚, 颜丽, 汪景宽, 等. 不同开垦年限黑土有机质变化的研究. 土壤通报, 2002, 33 (5): 332—335
Xin G, Yan L, Wang J K, et al. Changes of organic carbon in black soils with the different reclamation years (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33 (5): 332—335
- [10] 郝文英. 中国农业百科全书: 土壤卷. 北京: 农业出版社, 1996: 35—56
Hao W Y. China agriculture encyclopedia. Soil volume (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1996: 35—56
- [11] 于水强, 窦森, 张晋京, 等. 不同氧气浓度对玉米秸秆分解期间腐殖物质形成的影响. 吉林农业大学学报, 2005, 27 (5): 528—532
Yu S Q, Dou S, Zhang J J, et al. Effects of different oxygen concentrations on formation of humic substances during corn stalk decomposition (In Chinese). Journal of Jilin Agricultural University, 2005, 27 (5): 528—532
- [12] Li L, Huang W, Peng P, et al. Chemical and molecular heterogeneity of humic acids repetitively extracted From a peat. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67: 740—746
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2003: 870—878
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2003: 870—878
- [14] 文启孝. 土壤有机质研究法. 北京: 农业出版社, 1984: 231—234
Wen Q X. Research methods of soil organic matter (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1984: 231—234
- [15] 马良, 徐仁扣. 不同耕种年限红壤性水稻土理化性质的变化特征. 土壤, 2010, 42 (4): 560—563

- Ma L, Xu R K. Physico-chemical of paddy soils derived from quaternary red clay under different cultivated years (In Chinese). *Soils*, 2010, 42 (4): 560—563
- [16] 袁大刚, 张甘霖. 不同土地利用条件下的城市土壤电导率垂直分布特征. *水土保持学报*, 2010, 24 (4): 171—177
- Yuan D G, Zhang G L. Vertical distribution characteristics of electrical conductivity of urban soil under different land use type (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24 (4): 171—177
- [17] Liu X L, He Y Q. Impact of land use and soil fertility on distributions of soil aggregate fractions and some nutrients. *Pedosphere*, 2010, 20 (5): 666—673
- [18] 于君宝, 刘景双, 王金达, 等. 不同开垦年限黑土有机碳变化规律. *水土保持学报*, 2004, 18 (1): 27—33
- Yu J B, Liu J S, Wang J D, et al. Organic carbon variation law of black soil during different tillage period (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18 (1): 27—33
- [19] Wissing L, Kölbl A, Häusler W, et al. Management-induced organic carbon accumulation in paddy soils: The role of organo-mineral associations. *Soil & Tillage Research*, 2013, 126: 60—71
- [20] Watanabe T, Kimura M, Asakawa S. Dynamics of methanogenic archaeal communities based on RNA analysis and their relation to methanogenic activity in Japanese paddy field soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39 (11): 2877—2887
- [21] 江泽普, 黄绍民, 韦广泼, 等. 不同免耕模式对水稻产量及土壤理化性状的影响. *中国农学通报*, 2007, 23 (12): 362—365
- Jiang Z P, Huang S M, Wei G P, et al. Effects of no-tillage modes on rice yield and properties of paddy soil (In Chinese). *Chinese Agriculture Science Bulletin*, 2007, 23 (12): 362—365
- [22] 于森. 不同开垦年限水田土壤腐殖质组成及结构特征的研究. 长春: 吉林农业大学, 2014: 3—54
- Yu M. Research on the composition and structure characteristics of humus in paddy soil with different reclamation time (In Chinese). Changchun: Jilin Agricultural University, 2014: 3—54
- [23] 王晶, 何忠俊, 王立东, 等. 高黎贡山土壤腐殖质特性与团聚体数量特征研究. *土壤学报*, 2010, 47 (4): 723—733
- Wang J, He Z J, et al. Properties of humus and content of soil aggregates in soils on Gaoligong mountain (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (4): 723—733
- [24] 窦森. 土壤有机质. 北京: 科学出版社, 2010: 211—229
- Dou S. Soil organic matter (In Chinese). Beijing: Science Press, 2010: 211—229
- [25] 崔婷婷, 窦森, 杨轶囡, 等. 秸秆深还对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响. *土壤学报*, 2014, 51 (4): 718—725
- Cui T T, Dou S. Effects on humus composition and humic acid structure characteristics with deeply buried in field (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (4): 718—725
- [26] 于孝东, 唐晓红, 吕家格, 等. 稻草腐解过程中形成胡敏酸的组成和结构研究. *水土保持学报*, 2011, 25 (1): 224—228
- Yu X D, Tang X H, Lv J K, et al. Chemical composition and structure of humic acids from decomposed paddy straw residue (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25 (1): 224—228
- [27] 慈恩, 杨林章, 程月琴, 等. 耕作年限对水稻土有机碳分布和腐殖质结构特征的影响. *土壤学报*, 2008, 45 (5): 951—955
- Ci E, Yang L Z, Cheng Y Q, et al. Effect of cultivation history on distribution of organic carbon structure of humus in paddy soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (5): 951—955

Composition of humus and structure of humic acid as a function of age of paddy field

LIU Xin DOU Sen[†] LI Changlong WANG Peiyu

(College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract Relative to dry land, paddy field originally referred to artificially irrigated fields, where either paddy rice or upland crops were planted. Now only the field where paddy rice or some other aquatic plants are planted is called paddy field, or rice field. Different from the original paddy field, it has ridges to

store water. In South China, paddy fields are not only long in cultivation history but also be vast in area and studies on such paddy fields started quite earlier and are great in volume both at home and abroad, but only a few has been reported on paddy soil in North China. Rice is the main grain crop in China. A large proportion of the total grain output in this country comes from Northeast China, where the paddy fields reach over 66.7 billion hm^2 (including 53.3 billion hm^2 in Heilongjiang, and 6.6 billion hm^2 each in Jilin and Liaoning) and occupy an important position in the rice cultivation area of the country. However, the rice fields are mostly short in cultivation history and most of the paddy fields were turned from upland fields, and what's more, some of the paddy fields were turned back into upland fields again due to incomplete water conservancy facilities. During this kind of irregular changes, the soils in the fields would certain change in carbon fixation capacity, soil fertility and CO_2 emission. But little has been done at home and abroad on how they evolve. Therefore, the study on paddy soils in Northeast China is of great significance. Rice yield depends mainly on soil fertility, of which soil organic matter is an important component. Soil humus, being an important component of the soil solid phase material, plays a huge role in the genesis and development of soil fertility, and hence is also an important indicator for soil fertility. It does not only influence productivity of the farmland ecosystem, but also have a great impact on CO_2 concentration in the atmosphere through decomposition of soil organic matter. The study on how soil organic matter in the paddy field varies in content and composition is very important to making full use of land resources, realizing quality crop production, increasing grain output and being friendly to the environment.

Paddy fields different in cultivation history (5 a, 20 a and 50 a) in Qingshan Village, Chaoyangshan Town of Panshi City in Jilin Province, were selected as subjects for the study on changes in content of soil organic carbon (SOC), composition of water soluble substance (WSS), fulvic acid (FA), humic acid (HA) and humin (Hu), structure of HA and content of soil nutrients as a function of cultivation history. Results show that with rice cultivation going on from 5a to 50a, changes occurred in the surface (0 ~ 15 cm) and the subsurface (15 ~ 30 cm) soil layers. (1) The electric conductivity increased by 74.8% and by 113.7% respectively and soil available nitrogen, available phosphorus and available potassium by 0.24%, 15.8% and 29.7% and by 0.24%, 6.92% and 14.7%, respectively, while soil pH remained almost unchanged; (2) Total soil organic carbon increased by 42.1% and by 47.9%, respectively, and WSS, HA and Hu increased by 28.4%, 51.9% and 76.2% and by 28.4%, 84.9% and 70.1%, respectively, while FA decreased by 9.2% and by 1.74%, respectively, which indicates that rice cultivation in paddy field favors accumulation of organic carbon in the soil; (3) HA/(HA+FA) ratio (PQ) increased, indicating that humification of the soil is intensified; and (4) H/C, ΔLgK , E2920/1720 and E2920/1620 of HA all decreased, indicating that HA in the soil is enhanced in aromatization and condensation and becomes more complicated in structure.

Key words Cultivation history; Paddy fields; Soil organic matter; Humus constitution; Humic acid; Structural properties

(责任编辑: 卢 萍)