

## 水稻秸秆燃烧对土壤有机质组成的影响研究\*

黄兆琴<sup>1,2</sup> 胡林潮<sup>1</sup> 史明<sup>1</sup> 李学林<sup>1</sup> 代静玉<sup>1†</sup>

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 江苏城市职业学院, 南京 210036)

**摘要** 研究生物质(水稻秸秆)燃烧行为对土壤有机质含量和组成的影响,探讨不同燃烧次数下土壤中胡敏酸(HA)、富里酸(FA)、水溶性有机质(DOM)的含量和结构特征的变化情况。结果表明:土壤有机碳的变化仅在土壤表层几厘米以内,随燃烧频次增加土壤有机碳含量减少量增加,而水溶性有机质及组分则呈现不断增加的趋势。不同来源土壤的腐殖物质对生物质燃烧作用的响应不同,3种供试土样中腐殖物质随不同次数同强度秸秆燃烧并未呈现较一致的变化趋势,但每一种土壤的HA和FA含量及HA/FA、E4/E6值均随燃烧频次的增加呈现规律性的升高或者降低,而且FA含量的变化是影响HA/FA值大小的主导因素。此外,通过红外光谱图可知,随燃烧频次增加,FA中芳香性成分和含脂肪族C—OH、C—O物质增加,而HA由于本身芳香缩和度高而无明显变化。

**关键词** 生物质燃烧;水溶性有机质;胡敏酸;富里酸

**中图分类号** S153.6 **文献标识码** A

土壤作为天然有机质一个重要的载体,具有重要的环境和生态意义。土壤中有有机碳贮量非常巨大,土壤碳库的微小改变都会对全球气候变化产生显著影响。土壤有机质(Soil organic matter, SOM)尤其是腐殖物质(Humic substance)是长期腐殖化作用的产物,具有一定的稳定性,是全球碳循环的重要环节。因此,正确认识 and 量化有机碳对预测土壤中碳的转变 and 理解全球碳循环是非常必要的。火作为生态系统中一个特殊的因子,对生态环境具有很强大的调节作用,不仅是一种对自然的破坏力量,同时又是人类可以利用的管理工具<sup>[1-2]</sup>,对人类社会进化起到了重要作用。近年来,国内外学者开展了许多森林和草原火灾等偶发现象对发生地土壤性质的影响研究,结果表明:土壤作为火灾等生物质的燃烧场所,其物理化学性质会随燃烧强度和持续时间以及发生地环境因素不同而产生短期、中期、长期的变化,从而对土壤碳库产生影响。

目前我国关于生物质燃烧对土壤影响研究主要集中在森林和草原火灾等偶发事件对土壤的影响方面,对农田土壤中有有机质含量和组成研究甚少。但在我国秸秆田间焚烧现象普遍存在,何立

明<sup>[3]</sup>、毕与运<sup>[4]</sup>等的研究亦表明:近年来,我国秸秆焚烧火点数量和焚烧面积呈不断增长之势,秸秆焚烧不仅具有明显的区域性差异,并随耕作季节更替而周期性存在。但年复一年的秸秆燃烧可能对土壤有机质和其他因素产生怎样的作用尚未有报道。本文模拟秸秆燃烧对土壤有机质组成和结构的影响研究,探讨不同频次的秸秆燃烧对土壤有机质的作用,以期揭示生物质的燃烧对土壤有机质产生的影响,为研究和客观评估秸秆燃烧行为对土壤环境及有机碳稳定性的影响提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤样品前处理

土壤样品分别为采自太湖地区的砂青土(MG)、白头土(BT)、沼泽土(DS)。在田间按蛇形法随机采取表层土(0~15 cm),风干后过20目筛。将上述土样分别放在预先挖好的田间土槽中,平衡1周后,开展不同次数的秸秆燃烧。由于实际的田间秸秆焚烧是堆积焚烧,因此本实验设计每次按照单位面积秸秆产生量(干样量为 $874.5 \text{ g m}^{-2}$ )的4倍称量水

\* 国家自然科学基金项目(40571088)资助

† 通讯作者, E-mail: daijy@njau.edu.cn

作者简介:黄兆琴(1985—),助教,硕士,主要研究方向为环境污染化学。E-mail: hzq\_33@163.com

收稿日期:2010-07-28;收到修改稿日期:2011-01-17

稻秸秆,均匀覆盖在供试土壤表面后进行燃烧,并在第 0、3、8、16、30 次燃烧后分层采集 0~3 cm、3~

10 cm 及 0~10 cm 的样品待分析。供试土样的基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质  
Table 1 Basic properties of studied soils

供试土壤 Soil sample	pH(H <sub>2</sub> O)	总碳 Total C (g kg <sup>-1</sup> )	总氮 Total N (g kg <sup>-1</sup> )	C/N	颗粒组成 Particle composition(g kg <sup>-1</sup> )		
					黏粒 Clay	粉砂 Silt	砂粒 Sand
MG	5.42	16.13	1.52	10.61	209.7	214.9	575.3
BT	5.63	14.69	1.10	13.35	221.8	218.9	559.3
DS	5.67	13.52	0.97	13.94	206.4	217.6	576.0

## 1.2 供试土壤中有机质组分样品制备

水溶性有机质(Dissolved organic matter, DOM)制备采用水浸提法<sup>[5]</sup>:称取 5 g 经上述处理的土壤样品,并与去离子水 1:2.5 混合,连续振荡 4 h 后 4 000 r min<sup>-1</sup>离心 30 min,上清液过 0.45 μm 滤膜,滤液中的有机物即为水溶性有机质。

胡敏酸(HA)和富里酸(FA)样品的分离与制备采用国际腐殖酸协会(International Humic Substance Society, IHSS)分组制备方法<sup>[6]</sup>。

## 1.3 分析指标及测定方法

土壤 pH 采用电位法测定(水土质量比为 1:2.5,采用 pH-3c 型酸度计);土壤总有机碳含量采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定;土壤总氮采用凯氏定氮法;颗粒组成采用沉降法;中性糖、糖醛酸分别采用蒽酮比色法和咔唑比色法;HA、FA 含量采用重铬酸钾比色法;HA、FA 红外光谱采用 KBr 压片法测定(红外光谱型号:NICOLET 380,压片机为 YP-2);水溶性有机碳(DOC)采用 TOC 仪测定(型号为岛津 TOC-5000);胡敏酸的 E4/E6 采用分光光度计法(722N 型分光光度计),在 465 nm 和 665 nm 处分别测定胡敏酸溶液的消光值(分别记为 E4 和 E6),计算 E4/E6 比<sup>[7]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 燃烧频次对土壤有机碳含量的影响

生物质燃烧后,不同深度土壤所受影响程度不尽相同,因此本文分层讨论不同燃烧次数下土壤有机质的变化情况。各土层土壤有机碳的含量随燃烧次数变化如表 2 所示,结果表明:随着燃烧次数

的增加,各供试土壤表层 0~3 cm 中有机碳总量减少,3~10 cm 中有机碳含量基本与对照相当,而 0~10 cm 混合土样中略有减少。这说明秸秆燃烧对土壤的作用仅集中在表层 0~3 cm 中,对 3 cm 以下土层中有机物质的影响甚少,而 0~10 cm 样品中有机碳含量因混入 0~3 cm 土样而略显减少,且这种现象随燃烧次数增加而愈显著。Hartford、Gillon 等认为生物质燃烧时土壤温度随深度的变化趋势完全取决于表层可燃物质的厚度、覆盖率及湿度<sup>[8-10]</sup>,短暂而剧烈的燃烧对土壤的热传递仅在土壤表层

表 2 不同燃烧次数下不同深度土层中有机碳含量的变化  
Table 2 Changes in content of organic carbon in different depths of soil after burning different in frequency

样品 Sample	燃烧次数 Frequency	土层深度 Soil depth		
		0~3 cm	3~10 cm	0~10 cm
MG	0	16.13 ± 0.05b	16.13 ± 0.04a	16.13 ± 0.04bc
	3	16.70 ± 0.09a	16.36 ± 0.02a	16.23 ± 0.17ab
	8	15.97 ± 0.18b	16.27 ± 0.39a	16.54 ± 0.25ab
	16	15.32 ± 0.17c	16.61 ± 0.75a	16.62 ± 0.20a
	30	13.84 ± 0.19d	15.70 ± 0.41a	15.74 ± 0.05c
DS	0	13.52 ± 0.05c	13.52 ± 0.05b	13.52 ± 0.05c
	3	13.27 ± 0.26a	13.53 ± 0.25a	13.41 ± 0.01ab
	8	13.30 ± 0.05a	13.35 ± 0.17a	13.91 ± 0.50a
	16	12.57 ± 0.12b	13.32 ± 0.03a	13.35 ± 0.18ab
	30	12.47 ± 0.02a	13.47 ± 0.02a	13.15 ± 0.07b
BT	0	14.69 ± 0.04a	14.69 ± 0.04ab	14.69 ± 0.04ab
	3	14.55 ± 0.02ab	14.61 ± 0.06b	14.52 ± 0.06ab
	8	14.37 ± 0.01b	15.01 ± 0.11a	14.56 ± 0.04ab
	16	13.98 ± 0.04c	14.52 ± 0.00b	14.78 ± 0.35a
	30	13.58 ± 0.23d	15.02 ± 0.29a	14.30 ± 0.10b

注:不同小写字母表示差异达 5% 显著水平,下同图 Note: Different letters mean significant at 5% level. The same below

几厘米<sup>[11]</sup>。这与本文所得结论一致。李政海等<sup>[12]</sup>也认为在草原火烧过程中,表土层以下土壤温度随着土层深度的增加而急剧下降,生物质燃烧对土壤影响深度一般在 0.6 cm 以内,在 0.3 ~ 0.6 cm 土层中,土壤温度多在 65 ~ 80℃ 范围内,燃烧物的数量和风速对土壤温度起决定作用。Raison 等<sup>[13]</sup>也指出天然森林火灾发生对表层 5 cm 以下土壤基本无影响。由此看出,秸秆燃烧对土壤有机质的作用仅在土壤表层几厘米内较明显,土层越深受到热辐射影响越小。

研究表明,在温度和氧气浓度适宜情况下,受热后土壤有机质会在蒸发、氧化分解、碳化(形成炭黑)等作用下彻底转化为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O<sup>[11,14]</sup>,因此一般认为短期火烧后土壤有机碳含量会减少<sup>[15]</sup>;长期火烧后因生物矿化速率降低而使土壤有机碳增加。但由于生物质燃烧对土壤作用大小与燃烧的严重程度、可燃物的性质与数量及土壤性质等因素有关,不同研究者得出的生物质燃烧对土壤有机碳含量影响的结论不尽一致。耿玉清等<sup>[16]</sup>认为:轻度林火(地表残存有少量的灰分)后 0 ~ 5 cm 深度范围的土壤有机质含量有所提高,5 ~ 10 cm 的变化不明显,而中度林火(地表裸露、有水土流失现象发生)会显著降低土壤有机质和全氮含量。本文中有有机碳的组成包括两部分:一部分来自土壤所含的包括纤维素、木质素、水溶性物质和油脂等在内的非腐殖物质和腐殖酸等腐殖物质;另一部分则是秸秆在自身燃烧的同时被添加到土壤中的部分外来物质。虽然有新的有机物料被添加进土壤,但这部分有机物质含量小于原本存在于土壤中且被氧化分解的有机物质总量,所以土壤有机碳总体表现为减少的现象。并且随燃烧次数增加,热作用逐渐累积,土壤环境条件的不断变化使得有机碳的这种改变愈明显。秸秆燃烧后有机碳的变化表明秸秆燃烧对有机质的作用仅表现在表层几厘米土壤中,因此本研究着重探讨表层土壤中(0 ~ 3 cm)各有机质组分在秸秆燃烧后的变化情况。

## 2.2 燃烧频次对水溶性有机质含量及组成的影响

土壤中水溶性有机质主要来源于腐殖化的有机质和植物凋落物,土壤本身的自然环境和外来人为因素对水溶性有机质含量和组成有重要的影响。不同燃烧次数下表层土壤中水溶性有机质的变化如图 1 所示,结果显示:秸秆燃烧能够提高土壤中水溶性有机碳(DOC)及中性糖和糖醛酸的含量,并且随燃烧次数增加,水溶性有机质各组分的这种变化

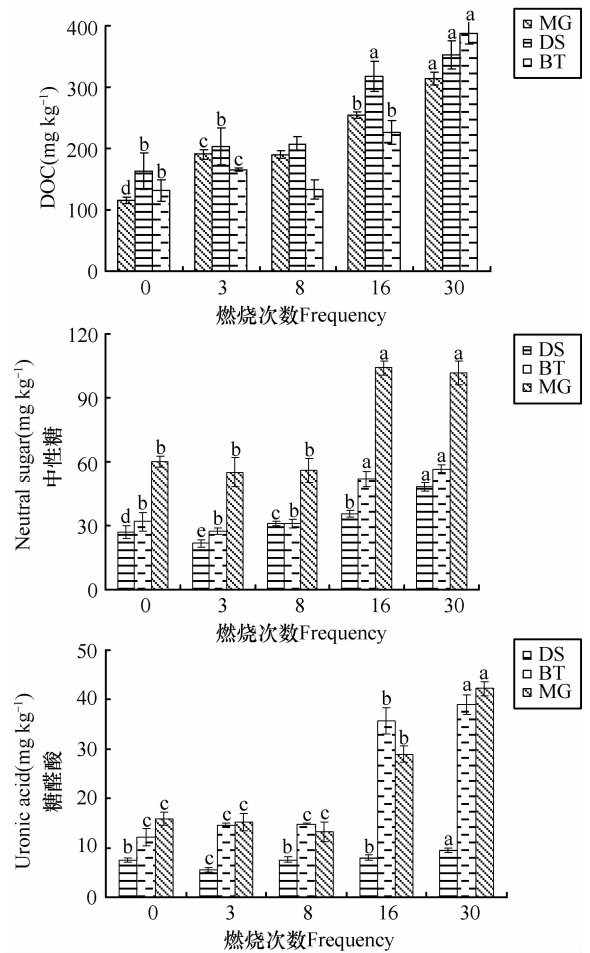


图 1 不同燃烧次数下供试表层土壤中 DOC、中性糖及糖醛酸含量的变化  
Fig. 1 Changes in content of dissolved organic matter, neutral sugar and uronic acid in surface soil after burning different in frequency

趋势越显著。燃烧一开始,土壤中的 DOC 含量立即发生变化,随燃烧次数增加而明显增加,第 30 次时其含量已增加为未经处理样品 2 ~ 3 倍。中性糖和糖醛酸对生物质燃烧的响应没有 DOC 明显,燃烧次数较少时,中性糖和糖醛酸的变化幅度不大,其含量基本与对照相当;当燃烧达到 16 次以上时,中性糖和糖醛酸的含量亦显著增加,分别为对照样品含量的 1.7 ~ 1.8 倍和 1.3 ~ 3.2 倍,说明这种短暂(2 ~ 3 min)而剧烈的秸秆燃烧能够显著增强土壤中水溶性有机质组分的含量,秸秆燃烧对于土壤中水溶性的组分具有明显的作用,并由此影响土壤中有有机、无机污染物质的迁移转化。

本研究中秸秆含有的大部分有机物料在燃烧过程通过挥发、氧化分解等作用变成气体逸散出去,残留的细小组分则通过土壤空隙添到土壤中,这部分秸秆物料还田后能增加土壤中水溶性总碳

的含量,增强土壤固相有机质的溶解能力<sup>[17]</sup>。从另一方面来讲,由于生物质燃烧对土壤的影响程度与诸多因素相关,不同温度下土壤有机质会发生不同的变化,100~200℃之间土壤有机碳主要因挥发、蒸馏等作用而减少<sup>[18-19]</sup>,130~190℃木质素和半纤维素开始分解,200℃以上发生碳化过程,超过300℃有机质结构发生改变<sup>[20]</sup>。本研究中秸秆燃烧时温度处于变化过程中,有机质发生复杂的变化过程,但本源与外源非腐殖物质的转化和土壤腐殖物质自身的降解、合成共同作用使得土壤总有机碳含量降低,水溶性有机质增加。虽然由土壤总有机碳的变化可知添加到土壤的有机碳量小于热解及转化所减少的碳量,但该条件下有机质的热解和非腐殖物质的转变等过程中生成了较多结构简单、水溶性强的含碳物质,从而促使DOC及中性糖和糖醛酸组分含量明显增加。总之,在外源物料的添加和土壤本身所含物质的分解转化双重作用下,土壤水溶性有机质含量增加。

### 2.3 燃烧频次对土壤腐殖物质含量和组成的影响

同强度不同次数累积燃烧下,供试表层土壤中腐殖物质含量和组成的变化情况如表3所示。结果表明:每一种供试土壤的HA和FA含量及HA/FA、E4/E6值均随燃烧次数的增加呈现规律性的升高或者降低。随燃烧次数的增加,3种供试土样的HA/FA分别随FA含量的减少、增加、增加而呈现增加、降低、降低的趋势,这表明FA含量的变化仍是影响HA/FA大小的主导因素,FA影响了土壤腐殖质聚

合程度,这与单一热辐射作用对土壤腐殖物质的影响所得结论相同<sup>[21]</sup>。由此可知FA对热作用的反应性大于HA,同时说明HA的稳定性强于FA,HA类物质结构较稳定,不易发生变化,而HA的E4/E6随燃烧次数增加的变化似乎也说明短暂而剧烈的秸秆燃烧没有对HA产生破坏性的作用,土壤自身的特性和HA的分解、缩合及少量外源物质的混入使得各供试土壤腐殖化程度和缩合度变化不同,HA和FA均处于动态的变化过程中。

干燥的土壤是热的不良导体,潮湿土壤中热传导更快、渗透更深,但由于土壤中水分蒸发需要热量,因此土壤水分未完全蒸发掉之前温度不超过95℃<sup>[22]</sup>;随后温度显著增加至200~300℃<sup>[23]</sup>。3种供试土壤本身的特性不同,在田间平衡一周后其持水量不同,因此对这种剧烈而短暂的热作用产生的效应不尽一致。不同土壤的导热性能有差别,这是由土壤不同组分的抗热性能不同所致<sup>[24]</sup>,从实验结果来看,有机质含量高的土壤导热性能较好,反之亦然;土壤中有有机质与矿物相紧密结合,热作用对有机质结构的改变程度与土壤矿物结合体亦有关<sup>[11]</sup>,不同矿物组成的土壤对热作用的抗性不同,受热后土壤矿物与有机质组分的结合能力可能发生改变,从而影响可提取腐殖物质的含量和组成。同时,通过分析不难得出:短暂(2~3 min)而剧烈的秸秆燃烧对各土壤腐殖物质作用并不是无序的,随燃烧次数增加,热作用效果累积,每一种土壤各组分的热效应愈发明显。

表3 不同燃烧次数下供试表层土壤中腐殖物质组成和含量的变化

Table 3 Changes in content and composition of humic substances in surface soil after burning different in frequency

样品 Sample	项目 Item	燃烧次数 Frequency				
		0	3	8	16	30
MG	HA	3.92 ± 0.12	3.40 ± 0.18	2.91 ± 0.85	3.32 ± 0.06	2.76 ± 0.04
	FA	5.76 ± 0.27	5.42 ± 0.41	4.45 ± 0.62	4.42 ± 0.11	3.24 ± 0.26
	HA/FA	0.68 ± 0.05	0.61 ± 0.02	0.67 ± 0.04	0.75 ± 0.02	0.85 ± 0.07
	E4/E6	3.11 ± 0.01	3.14 ± 0.03	3.69 ± 0.84	3.15 ± 0.06	3.66 ± 0.03
DS	HA	2.87 ± 0.66	2.82 ± 0.05	2.97 ± 0.06	3.02 ± 0.34	2.60 ± 0.17
	FA	4.99 ± 0.44	5.07 ± 0.39	6.47 ± 0.00	4.68 ± 0.19	6.00 ± 0.32
	HA/FA	0.58 ± 0.06	0.56 ± 0.05	0.46 ± 0.00	0.64 ± 0.06	0.43 ± 0.13
	E4/E6	4.84 ± 0.01	4.37 ± 0.011	4.30 ± 0.13	4.24 ± 0.14	4.31 ± 0.08
BT	HA	2.16 ± 0.08	2.54 ± 0.04	2.59 ± 0.04	2.52 ± 0.25	2.42 ± 0.21
	FA	4.08 ± 0.39	4.82 ± 0.19	5.55 ± 0.29	5.36 ± 0.27	5.14 ± 0.00
	HA/FA	0.53 ± 0.04	0.53 ± 0.02	0.47 ± 0.02	0.49 ± 0.02	0.47 ± 0.02
	E4/E6	3.72 ± 0.11	4.15 ± 0.08	4.14 ± 0.04	4.17 ± 0.01	4.52 ± 0.38

## 2.4 生物质燃烧对土壤腐殖质组分结构的影响

红外光谱是近代研究和表征分子结构和化学键的常用分析方法,具有高度特征性。每种分子都有其组成和结构决定的红外吸收光谱,根据化合物的红外吸收曲线的峰位、峰强及一些化合物官能团的特异性吸收峰可以判断化合物是否存在某些官能团。本研究主要通过红外光谱定性分析经不同频次燃烧后土壤腐殖物质各组分的结构变化情况。

**2.4.1 不同燃烧频次下 FA 的红外光谱** 3 种供试土壤 FA 红外光谱图(FTIR)如图 2 所示,根据 Kaisert<sup>[25]</sup> 及顾志忙<sup>[26]</sup> 等的图谱解析,可以看出 FA 组分的强吸收峰出现在  $3\ 300 \sim 3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 600 \sim 1\ 650\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 120 \sim 1\ 170\ \text{cm}^{-1}$ ,表明 FA 含有一COOH、苯酚及醇中的一OH、醛、酮中  $\text{C}=\text{O}$  或芳香基上的  $\text{C}=\text{C}$  及脂肪族上的  $\text{C}-\text{H}$ 、 $\text{C}-\text{OH}$ 、

$\text{C}-\text{O}$  等官能团结构。

通过对供试土壤经 0、3、30 次燃烧后其中 FA 的红外光谱图的分析发现:第 30 次燃烧后提取的 FA 中  $1\ 600 \sim 1\ 650\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 120 \sim 1\ 150\ \text{cm}^{-1}$  处峰均强于对照,表明此时 FA 组分中醛、酮中  $\text{C}=\text{O}$  的伸缩振动或芳香基上的  $\text{C}=\text{C}$  伸缩振动及脂肪族上的  $\text{C}-\text{OH}$ 、 $\text{C}-\text{O}$  伸缩振动增强,即 FA 中芳香性成分和含脂肪族  $\text{C}-\text{OH}$ 、 $\text{C}-\text{O}$  物质增加。虽然秸秆燃烧的过程剧烈而又短暂,持续时间不长,但多次燃烧下 FA 表现出芳香性成分增加的现象,这说明一定强度热作用下残余有机质中 FA 组分的稳定性得到增强。生物质在土壤表面燃烧时不仅向土壤辐射热量还将部分烧焦的、碳化的物质和微生物残渣等外源物料添加到土壤环境中,并随后续的燃烧而参与到土壤有机质的分解和聚合中,使得 FA 中含脂肪族  $\text{C}-\text{OH}$ 、 $\text{C}-\text{O}$  物质增加。

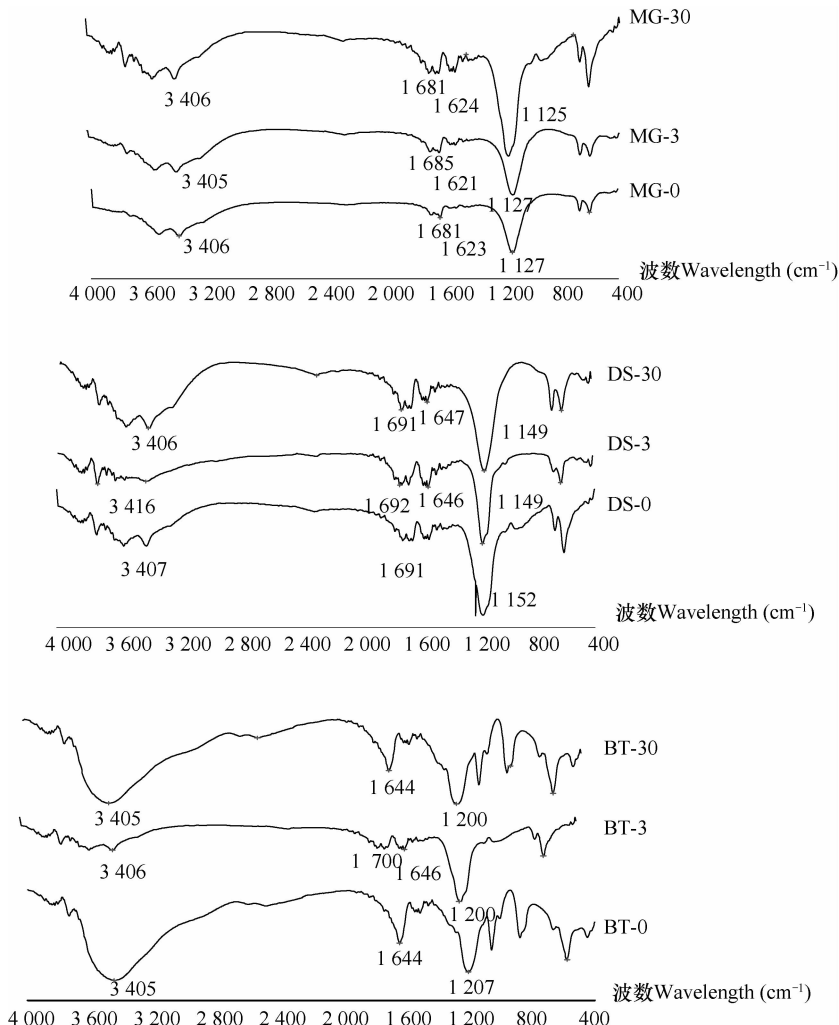


图 2 不同燃烧次数(0、3、30 次)下供试表层土壤(0~3 cm)中 FA 的红外光谱图

Fig. 2 FTIR of FA in surface soil after burning different in frequency

**2.4.2 不同燃烧频次下 HA 的红外光谱** 由图 3 可知,各土壤 HA 的 FTIR 图谱基本相同,强吸收峰均在  $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 、 $2\ 920\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 650 \sim 1\ 600\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 200 \sim 1\ 100\ \text{cm}^{-1}$  处,可知其主要官能团为—COOH 或苯酚及醇中的—OH、脂肪族— $\text{CH}_3$ 、— $\text{CH}_2$ 、醛、酮中  $\text{C}=\text{O}$ 、芳香基上的  $\text{C}=\text{C}$ 、羧基上的  $\text{C}=\text{O}$ 、 $\text{C}-\text{OH}$  等,其中  $1\ 600 \sim 1\ 650\ \text{cm}^{-1}$  处强烈的吸收峰表明 HA 含有较多的芳香族不饱和物质, $2\ 920\ \text{cm}^{-1}$  左右处有一明显的吸收峰且强于 FA,说明 HA 较 FA 含有更多的脂肪族物质。

HA 是土壤腐殖物质中结构较稳定、芳香缩和度较高的物质,几种供试土壤 HA 含量及 E4/E6 值

并未随秸秆燃烧次数的增加而呈现一致变化趋势。同样地,通过对第 0、3、30 次燃烧后 HA 红外光谱的分析可知:来源于不同土壤的 HA 各吸收峰所代表的官能团结构物质的差异不明显。虽然在燃烧过程中不断地有少许烧焦的、难熔的物质和植物、微生物残渣被添加到土壤中,同时随燃烧次数的增加,表层土壤有碳化变黑的迹象,但燃烧过程中有机质往往同时发生几种转变过程,有机物质因温度和热传导时间的不同而处于降解和合成的动态平衡中,在此燃烧条件,HA 表现出较杂乱的变化。此外,秸秆燃烧过程中产生少许丝炭物质混入可提取 HA 中,也可能是导致其结构变化不明显的原因。

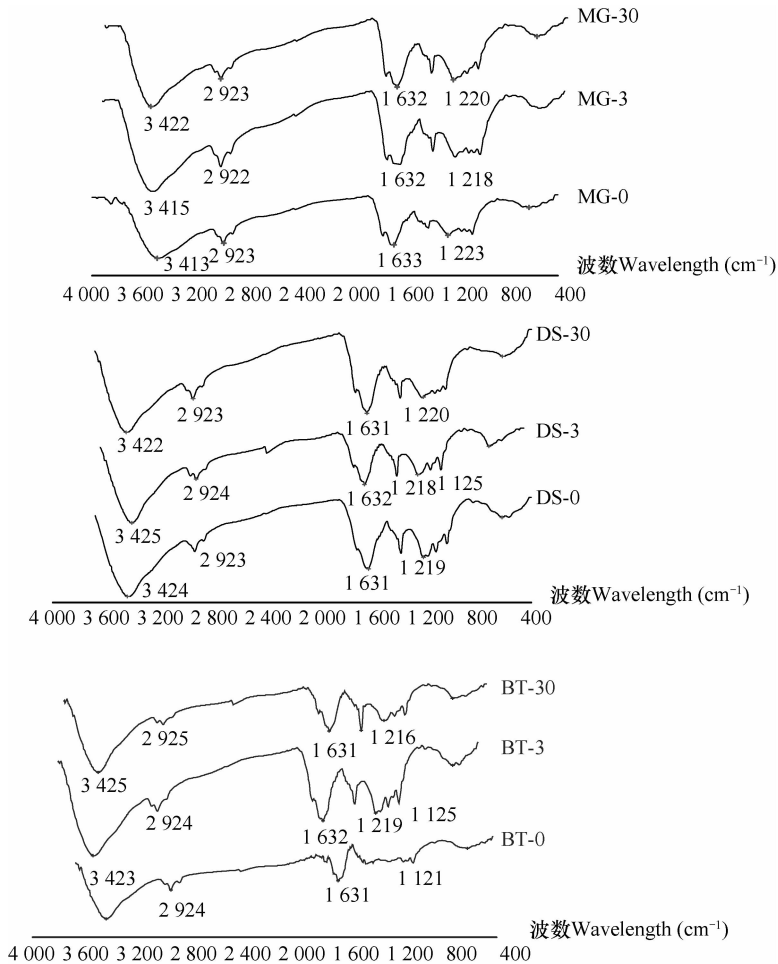


图 3 不同燃烧次数(0、3、30)下,供试表层土壤中 HA 的红外光谱图

Fig. 3 FTIR of HA in surface soil after burning different in frequency

土壤有机质各组分抗热能力不同,即使是高温下也不可能一致;未腐殖化和腐殖化有机物质受热后表现出的抗热性能不同,FA 和 HA 虽然较纤维素、木质素等物质耐热<sup>[24]</sup>,但从受热后其含量和红外谱图的变化来看,FA 相比 HA 而言对热作用更为

敏感,相同条件下 FA 的物质结构会优于 HA 而被改变。从朱燕等<sup>[27]</sup>对土壤 FA 和 HA 的热重(TG)分析曲线可知,FA 的主要失重峰在  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  附近,而 HA 主要失重温度稍高,在  $359\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外,根据自由体积理论的观点,物质的玻璃态转化温度( $T_g$  值)的大小

与大分子骨架的硬度正相关,HA 具有相对大的分子量和相对高芳香性,因此其  $T_g$  值高于 FA。将大分子的活性和  $T_g$  值代表的含义扩展到成岩和热改变上来,即增加含碳土壤有机质(C-SOM)的芳香性和分子量及特性可能会使其硬度大于含氢土壤有机质(H-SOM)<sup>[28]</sup>,也就是说热作用改变 HA 要较改变 FA 难,本文所得结论与之相符。

### 3 结 论

1) 生物质燃烧对土壤有机质的作用仅在表层几厘米内,短暂而剧烈的燃烧作用下土壤有机碳含量减少,并且随燃烧次数增加,土壤有机质的减少愈明显。

2) 外源秸秆存在下的燃烧一发生,土壤中水溶性的有机质组分含量立即增加,并随燃烧次数增加而显著增加,中性糖和糖醛酸与水溶性总碳具有相同的变化趋势。

3) 由于土壤本身的物理化学条件和有机质组成不同,3 种供试土样腐殖物质随同强度不同次数秸秆燃烧并未呈现较一致的变化趋势,但每一种土壤的 HA 和 FA 含量及 HA/FA、E4/E6 值均随燃烧次数的增加呈现规律性的升高或者降低,FA 含量的变化是影响 HA/FA 值大小的主导因素。

4) 腐殖物质的红外光谱图表明:随燃烧次数增加,FA 中芳香性成分和含脂肪族 C—OH、C—O 物质增加,而 HA 由于本身芳香缩和度高而无明显变化。

### 参 考 文 献

[ 1 ] 周道玮,张喜军,张宏. 草地火生态学进展. 长春:吉林科学技术出版社,1995. Zhou D W, Zhang X J, Zhang H. The research development of fire ecology in grassland (In Chinese). Changchun: Jilin Science and Technology Press,1995

[ 2 ] 周道玮,张喜军,张宏. 植被火生态与植被火管理. 长春:吉林科学技术出版社,1995. Zhou D W, Zhang X J, Zhang H. The vegetation fire ecology and management (In Chinese). Changchun: Jilin Science and Technology Press,1995

[ 3 ] 何立明,王文杰,王桥,等. 中国秸秆焚烧的遥感监测与分析. 中国环境监测, 2007, 23(1): 43—50. He L M, Wang W J, Wang Q, et al. Evaluation of the agricultural residues burning reduction in China using MODIS Fire Product (In Chinese). Environmental Monitoring in China, 2007, 23(1): 43—50

[ 4 ] 毕于运,王亚静,高春雨. 我国秸秆焚烧的现状危害与禁烧管理对策. 安徽农业科学,2009, 37(27):13 181—13 184. Bi Y Y, Wang Y J, Gao C Y. Problems of burning straw and its management countermeasures in China (In Chinese). Journal of An-

hui Agricultural Sciences, 2009, 37(27):13 181—13 184

[ 5 ] 张甲坤,陶澍,曹军. 土壤中水溶性有机碳测定中的样品保存和前处理方法. 土壤通报,2000,31(4): 174—176. Zhang J S, Tao S, Cao J. Soil sample preservation and pretreatment for water soluble organic carbon determination (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2000, 31(4): 174—176

[ 6 ] Kuwatsuka S, Tsutsuki K, Kumada K. Chemical studies on soil humic acids. I. Elemental composition of humic acids. Soil Sci Plant Nutr, 1978, 24: 337—347

[ 7 ] Chen Y, Senesi N, Schnitzer M. Information provided on humic substances by E4/E6 ratios. Soil Sci Soc Am J,1977,41: 352—358

[ 8 ] Hartford R A, Frandsen W H. Surface flaming may not portend extensive soil heating. Int J Wildland Fire, 1991, 2: 139—144

[ 9 ] Gillon D, Gomendy V, Houssard C, et al. Combustion and nutrient losses during laboratory burns. Int J Wildland Fire, 1995, 5: 1—12

[ 10 ] Campbell G S, Jungbauer J D Jr, Bidlake W R, et al. Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity. Soil Sci, 1994, 158: 307—313

[ 11 ] Certini G. Effect of fire on properties of forest soils: A review. Oecologia, 2005, 143: 1—10

[ 12 ] 李政海, 鲍雅静. 草原火的热状况及其对植物的生态效应. 内蒙古大学学报:自然科学版,1995, 26(4): 490—495. Li Z H, Bao Y J. The heat regimes of steppe fire and their ecological effects on plants (In Chinese). Acta Scientiarum Naturalium Universitatis NeiMonggol, 1995, 26(4): 490—495

[ 13 ] Raison R J, Woods P V, Jakobsen B F, et al. Soil temperatures during a following low-intensity prescribed burning in an *Eucalyptus pauciflora* forest. Aust J Soil Res, 1986, 24: 33—47

[ 14 ] Fernandez I, Cabainero A, Carballas T. Organic matter changes immediately after a wildfire in an Atlantic forest soil and comparison with laboratory soil heating. Soil Biol. Biochem, 1997, 29: 1—11

[ 15 ] Neff J C, Harden J W, Gleixner G. Fire effects on soil organic matter content, composition, and nutrients in boreal in terior Alaska. Can J For Res, 2005, 35: 2 178—2 187

[ 16 ] 耿玉清,周荣伍,李涛,等. 北京西山地区林火对土壤性质的影响. 中国水土保持科学, 2007, 5(5): 66—70. Di Y Q, Zhou R W, Li T, et al. Influences of forest fire on soil properties in Xishan area of Beijing (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(5): 66—70

[ 17 ] Riffaldi R, Levi-Minzi R, Saviozzi A, et al. Adsorption on soil of dissolved organic carbon from farmyard manure. Agric Ecosyst Environ, 1998, 69: 113—119

[ 18 ] Kang B T, Sajjapongse A. Effects of heating on properties of some soils from Southern Nigeria and growth of rice. Plant Soil, 1980, 55: 85—95

[ 19 ] Giovannini G, Lucchesi S. Modifications induced in soil physicochemical parameters by experimental fires at different intensities. Soil Sci, 1997, 162: 479—486

[ 20 ] José A. González-Pérez, Francisco J. et al. The effect of fire on soil organic matter—A review. Environ Int, 2004, 30: 855—870

- [21] 黄兆琴, 胡林潮, 代静玉. 热辐射对水稻土有机质组成的影响. 土壤, 2009, 41(4): 505—511. Huang Z Q, Hu L C, Dai J Y. Influences of thermal radiation on components of organic matter in paddy soils (In Chinese). Soils, 2009, 41(4): 505—511
- [22] Campbell G S, Jungbauer J D Jr, Bidlake W R, et al. Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity. Soil Sci, 1994, 158: 307—313
- [23] Franklin S B, Robertson P A, Fralish J S. Small-scale fire temperature patterns in upland Quercus communities. J Appl Ecol, 1997, 34: 613—630
- [24] Fernandez I, Cabaneiro A, Carballas T. Thermal resistance to high temperatures of different organic fractions from soils under pine forests. Geoderma, 2001, 104: 281—298
- [25] Kaiser K, Zech W. Natural organic matter sorption on different mineral surfaces studies by FTIR spectroscopy. Sci Soils, 1997, 2: 71—74
- [26] 顾志忙, 王晓蓉. 傅里叶变换红外光谱和核磁共振法对土壤中腐殖酸的表征. 分析化学, 2000, 28(3): 314—317. Gu Z M, Wang X R. Characterization of humic acid extracted from different soils by fourier transform infrared spectrometry and nuclear magnetic resonance spectroscopy (In Chinese). Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2000, 28(3): 314—317
- [27] 朱燕, 李爱民, 代静玉, 等. 土壤有机质级份红外和热重特性. 环境化学, 2005, 24(3): 287—292. Zhu Y, Li A M, Dai J Y, et al. Characteristics of soil humic substances by infrared spectra and thermal gravity (In Chinese). Environmental Chemistry, 2005, 24(3): 287—292
- [28] Zhang L, Eugene J, Leboeuf, et al. Thermal analytical investigation of biopolymers and humic-and carbonaceous-based soil and sediment organic matter. Environ Sci Technol, 2007, 41: 4 888—4 894

## CHANGES IN COMPOSITION OF SOIL ORGANIC MATTER AFTER BURNING OF STRAW

Huang Zhaoqin<sup>1,2</sup> Hu Linchao<sup>1</sup> Shi Ming<sup>1</sup> Li Xuelin<sup>1</sup> Dai Jingyu<sup>1†</sup>

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

(2 Jiangsu City Vocation College, Nanjing 210036, China)

**Abstract** Effects of burning biomass (rice straw) in the field on content and composition of soil organic matter were studied to explore changes in content and structure of humic acid (HA), fulvic acid (FA) and dissolved organic matter (DOM) in relation to frequency of burning. It was found that change in soil organic carbon occurred only within a few millimeters of surface soil layer. It decreased in content and the magnitude of the drop increased with frequency of burning, while soluble organic matter and its components increased in content. Humic substances from different sources responded differently to burning. The humic substances in three studied soils didn't show any consistent variation trend with frequency burning, but HA and FA contents, HA/FA and E4/E6 increased or decreased regularly with increasing frequency of burning. The change in FA content was the leading factor affecting HA/FA ratio. Besides, from the FTIR, it was learnt that in FA aromatic fractions and Aliphatic substances, like C—OH, C—O, increased as frequency of burning increasing, while changes in HA were not noticeable because the aromatic condensation of HA per se is high.

**Key words** Straw burning; Dissolved organic matter; Humic acid; Fulvic acid