



李亚男, 武俊男, 高 强, 等. 不同种植年限苏打盐碱型水稻土水溶性有机物三维荧光光谱特征分析[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(1): 44-49.

不同种植年限苏打盐碱型水稻土水溶性有机物 三维荧光光谱特征分析

李亚男¹, 武俊男¹, 高 强¹, 高云航², 刘淑霞¹

(1 吉林农业大学 资源与环境学院/吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室, 吉林 长春 130118;
2 吉林农业大学 动物科学技术学院, 吉林 长春 130118)

摘要:【目的】揭示不同种植年限苏打盐碱型水稻土水溶性有机物(WEOM)的变化规律,为苏打盐碱型水稻土固定有机碳提供理论基础。【方法】利用三维荧光光谱技术研究种植水稻 0、1、3、5、15 和 20 年对苏打盐碱地土壤中 WEOM 含量(w)及其三维荧光特性的影响。【结果】随种植年限的延长,土壤 WEOM 的含量先增加后逐渐降低,在种植 3 年时达最大($259.29\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),而在 20 年时最小($19.29\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);土壤中 WEOM $D_{254\text{ nm}}$ 随种植年限增加而增加;WEOM 的三维荧光图谱形状和荧光强度不同,荧光强度随种植年限的增加而增强;随种植年限增加,水稻土中区域 I 和区域 II 的荧光峰的发射光波长发生了蓝移,而区域 III 和区域 V 发射光波长发生了红移;土壤积分值为区域 V > 区域 III > 区域 IV > 区域 II > 区域 I;种植 20 年后,类腐殖物质占 WEOM 的百分比降低。【结论】苏打盐碱型水稻土中类富里酸、类腐殖物质以及含有不饱和双键的芳香族化合物含量随种植年限而增加。三维荧光技术适用于研究土壤中 WEOM 的结构和组分。

关键词:种植年限; 苏打盐碱型水稻土; 水溶性有机物; 三维荧光光谱
中图分类号:S153.5;S156.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-411X(2017)01-0044-06

Three-dimensional fluorescence spectral characteristics of water extractable organic matter in soda saline-alkaline paddy soil with different planting years of rice

LI Ya'nan¹, WU Junnan¹, GAO Qiang¹, GAO Yunhang², LIU Shuxia¹

(1 College of Resources and Environmental Science, Jilin Agricultural University /Key Laboratory of Soil Resource Sustainable Utilization for Jilin Province Commodity Grain Bases, Changchun 130118, China;
2 Animal Science and Technology College, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract:【Objective】To investigate the changing patterns of water extractable organic matter (WEOM) in soda saline-alkaline paddy soil in the fields with different planting years of rice, and provide a theoretical basis for increasing organic carbon fixation in such soil. 【Method】Three-dimensional fluorescent spectroscopy was performed to study the contents and fluorescence characteristics of WEOM in soda saline-alkaline paddy soil with 0, 1, 3, 5, 15 and 20 planting years of rice. 【Result】With the increase of planting age, the content of WEOM in soil first increased and then decreased, reached the maximum ($259.29\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) after planting rice for three years, and was the lowest (19.29

mg · kg⁻¹) after planting rice for 20 years. The absorbance of WEOM at UV 254 nm increased with planting age. The shape of the three-dimensional fluorescence spectra of WEOM was different from fluorescence linear density which increased with planting age. There was a blue shift in the emission wavelength of the fluorescence peak in region I and region II of paddy soil, and a red shift in region III and region V. The fluorescence regional integration values were region V > region III > region IV > region II > region I. The proportion of humic acid-like substance in WEOM was reduced after planting rice for 20 years. 【Conclusion】 The humic substances, fulvic acid-like substance and unsaturated aromatic compounds in soda saline-alkaline paddy soil increase with planting age. Three-dimensional fluorescence technique can be applied to study the structure and composition of WEOM in soil.

Key words: planting age; soda saline-alkaline paddy soil; water extractable organic matter; three-dimensional fluorescence spectra

水溶性有机物(Water extractable organic matter, WEOM)是土壤有机质的重要组成部分,一般不超过200 mg · kg⁻¹,是土壤微生物可直接利用的有机碳源^[1]。WEOM不仅可以影响C、N、P和K等营养元素的生物有效性及重金属等污染物的迁移能力,而且还是矿物风化、成土过程以及微生物生长代谢、土壤有机质分解和转化等过程的重要影响因素^[2]。土壤中WEOM来源于林木枯枝落叶、根系分泌物、土壤微生物活动以及有机质的分解^[3]。张金波等^[4]研究表明,湿地土壤及水体中水溶性有机碳的产生、迁移与转化对湿地土壤碳通量具有重要影响。土壤中WEOM的质量分数与土壤类型有关^[5]。黄学夏等^[6]研究表明不同耕作、施肥方式将影响紫色水稻土的WEOM的含量。倪进治等^[7]研究表明土壤中水溶性有机碳含量与总有机碳和微生物量碳含量呈正相关,水溶性有机碳主要由碳水化合物碳、羧基碳和长链脂肪碳组成。研究表明冻融交替可增加水稻土中水溶性有机碳的质量分数^[8-9]。陈涛等^[10]研究表明施用有机肥有利于增加土壤中WEOM的质量分数。已有运用三维荧光光谱技术分析WEOM组成和结构的研究。张甲坤等^[11]指出中国东部土壤WEOM具有相似的荧光光谱特征。李明堂等^[12]利用三维荧光光谱技术分析了大豆和玉米根部土壤WEOM的组成和结构。

松嫩平原苏打盐碱土是世界3大盐碱土分布区之一,总面积为3.2 × 10⁴ km²^[13]。种植水稻是改良盐碱土的主要方式,吉林西部苏打盐碱土区的水稻种植面积逐年在扩大,已有关于苏打盐碱土种植水稻后土壤中养分含量的变化研究^[14]。本文以不同种植年限的苏打盐碱型水稻土为研究对象,利用三维荧光技术对土壤中WEOM的组成和结构进行分析,揭示苏打盐碱型水稻土WEOM的变化规律,为提高苏打盐碱型水稻土有机物的固碳能力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试土壤于2014年11月采自吉林省松原市前郭县套浩太乡碱巴拉村北,包括种植水稻0、1、3、5、15和20年的苏打盐碱型水稻土6种样品。每块农田用蛇形取样法采集5点的耕层土壤(0~20 cm),混匀。样品风干后,去除肉眼可见的动植物残体和杂物,过2 mm筛子备用。

1.2 方法

1.2.1 WEOM提取及含量测定 WEOM通常是指按照一定比例将土壤与纯水混合,经过振荡可以通过0.45 μm滤膜的有机物质^[15]。称取过2 mm筛子的土壤样品25 g放置于150 mL的三角瓶中,加入100 mL蒸馏水,振荡(转速120 r · min⁻¹, 25 ℃)20 min,静止5 min后,取上清液8 000 r · min⁻¹离心5 min,用0.45 μm滤膜抽滤,收集滤液用于有机物质量分数及荧光光谱的测定,方法参照文献[7]。土壤中有有机物质量分数采用重铬酸钾容量法(外加热法)测定;WEOM用有机碳分析仪(TOC)进行测定。

1.2.2 WEOM紫外吸收光度值的测定 紫外-可见光光度计(UV-2300PC)测定滤液在254 nm的光密度 $D_{254\text{ nm}}$,参考文献[16]计算单位浓度下WEOM的紫外吸光度值($\text{SUV}_{254\text{ nm}}$)。

$$\text{SUV}_{254\text{ nm}} = D_{254\text{ nm}} / (\rho \times 100),$$

式中, ρ 为WEOM的质量浓度(mg · L⁻¹)。

1.2.3 WEOM的三维荧光光谱测定 在PMV电压为700 V,激发光波长为200~450 nm,间隔为5 nm,发射光波长为220~600 nm,间隔为1 nm,激发光和发射光的狭缝宽度都为5 nm的条件下,用HATCH F-7000型荧光光谱仪测定土壤中WEOM的三维荧光光谱。

1.3 数据处理

采用 SPSS、Origin 和 Matlab 软件进行数据整理和分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植年限苏打盐碱型水稻土的有机质和 WEOM

表 1 为不同种植年限苏打盐碱型水稻土有机质 (Soil organic matter, SOM) 和 WEOM 质量分数。由表 1 可知,随种稻年限的增加,盐碱型水稻土中 SOM 含量呈现增加的趋势。与不种植水稻相比,种植水稻 1~20 年的土壤有机质增加了 2.6%~64.2% (表 1),种植水稻前 3 年有机物含量有所增加但变化并不显著,但在种植 5 年以后土壤中 SOM 含量显著增加 ($P<0.01$)。由表 1 可知,随着种植年限的增加,盐碱型水稻土中 WEOM 先增加后降低,在水稻种植 3 年时土壤中 WEOM 增加到最大值 (259.29 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),而后下降,到种植 20 年时,土壤中 WEOM 为 19.29 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,比不种植水稻土壤下降了 131.3%。这一变化趋势与土壤总有机质的变化趋势不同。废弃草原种植水稻后土壤中的有机残体增加,作物根系量和根系分泌物增加,WEOM 来源增加,另一方面也增加了微生物的碳源,微生物活性增强,使得土壤中 WEOM 含量增加。而随着土壤种植年限的延长,水稻土中 WEOM 含量受人为活动影响较大,土壤中 WEOM 发生了转化,含量降低。不同种植年限苏打盐碱型水稻土中水溶性有机碳占土壤有机碳总量的比值变幅为 0.09%~1.88%,随着种植年限的延长,土壤水溶性有机碳占有机碳总量的比值先逐渐增加而后降低,在种植 3 年时达到最大值,在种植 20 年时达到最小值。

测定 WEOM 紫外光密度来掌握不同种植年限苏打盐碱型水稻土中 WEOM 的组成。不同种植年限苏打盐碱型水稻土 WEOM 紫外光密度的变化特征列于表 1。由表 1 可以看出,随种植年限的增加,土壤中 WEOM 在 254 nm 的光密度逐渐变大,不同处理间差异均极显著 ($P<0.01$),说明苏打盐碱型水稻土中腐殖类物质以及含有不饱和双键的芳香族化合物含量随水稻种植年限的增加而增加。与不种植水稻相比,种植水稻 1 年土壤中的芳香类化合物的变化较小,种植达 3 年时,腐殖类物质及芳香类化合物含量变化较大,土壤 WEOM 的芳香度增加,说明随种植年限的增加苏打盐碱型水稻土腐殖化程度逐渐增强。

表 1 不同种植年限苏打盐碱型水稻土水溶性有机物紫外吸光度及有机物质量分数¹⁾

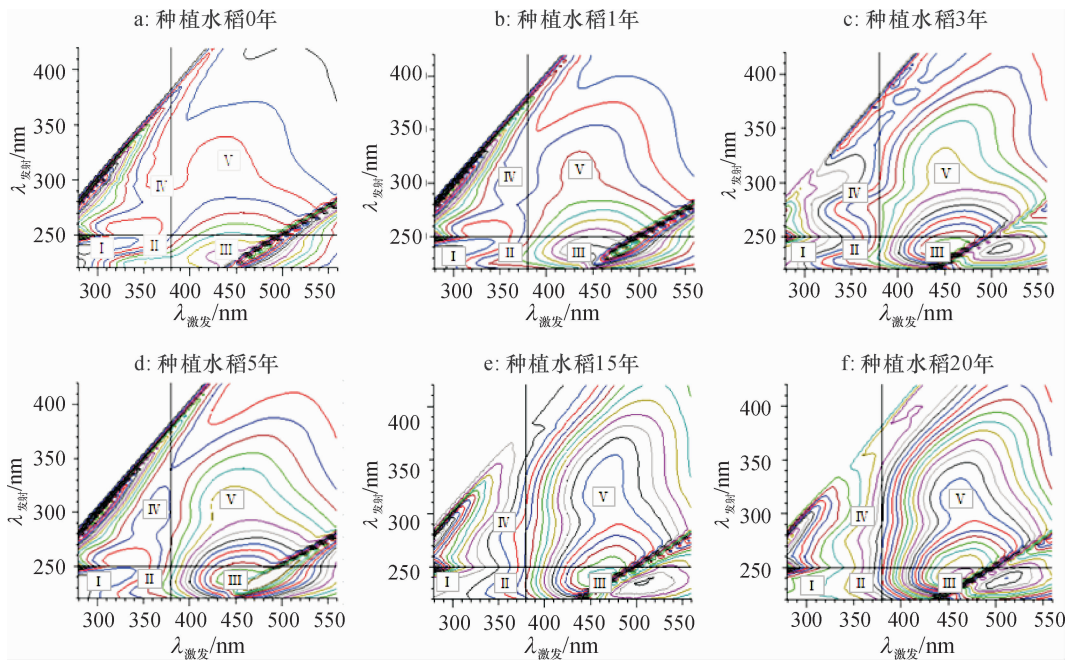
Tab. 1 UV absorbance values of WEOM and SOM contents in soda saline-alkaline paddy soil with different planting years of rice

种植水稻年限	$D_{254\text{ nm}}$	$\text{SUV}_{254\text{ nm}}$	$w(\text{WEOM})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{SOM})/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$
0	0.53F	2.04E	44.63D	13.1D
1	0.84E	1.68D	86.28B	13.45D
3	1.05D	2.78C	259.29A	13.83CD
5	1.32C	3.31B	81.76C	16.36C
15	1.67B	3.34B	19.92E	18.27B
20	2.70A	3.79A	19.29F	21.58A

1) 同列数据后凡具有一个大写字母者,表示差异不显著 ($P>0.01$, LSD 检验)。

2.2 不同种植年限苏打盐碱型水稻土 WEOM 三维荧光光谱图

不同有机物质的荧光激发光波长和发射光波长不同,因此由不同物质组成的土壤中的 WEOM 会呈现出不同的光谱图。根据文献[12]将光谱图分为 5 个区域:区域 I 为类酪氨酸蛋白质(激发光波长和发射光波长范围分别为 220~250 nm 和 280~330 nm);区域 II 为类色氨酸蛋白质(激发光波长和发射光波长范围分别为 220~250 nm 和 330~380 nm);区域 III 为类富里酸(激发光波长和发射光波长范围分别为 220~250 nm 和 380~480 nm);区域 IV 为类溶解性微生物代谢产物(激发光光波长和发射光波长范围分别为 250~360 nm 和 280~380 nm),区域 V 为类腐殖酸(激发光波长和发射光波长范围分别为 250~420 nm 和 380~520 nm)。对所提取的 WEOM 进行荧光光谱分析,得到不同种植年限苏打盐碱型水稻土的 WEOM 组成的变化(图 1)。由图 1 可知,不同种植年限下盐碱型水稻土的三维荧光光谱图的形状和各荧光线条密度不同,与不种植水稻的土壤相比,水稻种植 3 和 5 年时,IV 区的荧光密度较大,这说明水稻种植 3 年后土壤中类溶解性微生物代谢产物较多,水稻种植 20 年土壤中 WEOM 在区域 III 和区域 V 的荧光线条密度最大,而且可以看到明显的峰值,即土壤中类富里酸和腐殖酸类物质含量较大;随着种植年限的增加,土壤中 WEOM 的三维荧光线条密度增强,尤其是在区域 III 和区域 V,这说明水稻的种植有助于土壤产生类富里酸和腐殖酸类物质。这一结果与紫外光光谱分析一致。



图中区域 I、区域 II、区域 III、区域 IV、区域 V 分别为类酪氨酸蛋白质、类色氨酸蛋白质、类富里酸、类溶解性微生物代谢产物和类腐殖酸; 荧光密度越大说明荧光强度越强。

图 1 不同种植年限苏打盐碱型水稻土水溶性有机物荧光光谱图

Fig. 1 Fluorescence spectrogram of WEOM in soda saline-alkaline paddy soil with different planting years of rice

2.3 荧光峰位置与荧光强度分析

水溶性有机物的荧光强度所对应的激发光波长/发射光波长能够表明该区域的结构和组成特性。研究^[12]表明,若荧光峰对应的激发光波长/发射光波长变大,即为红移,反之,即为蓝移;若是变化的波长出现在腐殖质类物质区,则说明腐殖质等芳香族化合物增多,有机物质的芳香度和分子质量增加。如表 2 所示,在不同种植年限苏打盐碱型水稻土中,区

域 I 荧光峰的发射光波长从 230 nm 蓝移到 225 nm, 区域 II 荧光峰的发射光波长从 240 nm 蓝移到 225 nm,表明苏打盐碱土在种植水稻后,土壤中的蛋白类物质减少;区域 III 发射光波长从 455 nm 红移到 476 nm、区域 V 发射光波长从 466 nm 红移到 506 nm,即说明随着种植水稻年限的延长,水稻土 WEOM 中富里酸和腐殖质明显增多,有机物质的芳香度和分子质量增加。

表 2 不同种植年限苏打盐碱型水稻土 WEOM 荧光峰的光谱特征

Tab. 2 The excitation/emission wavelengths and fluorescence densities of WEOM in soda saline-alkaline paddy soil with different planting years of rice

种植水稻 年限	荧光峰 I		荧光峰 II		荧光峰 III		荧光峰 IV		荧光峰 V	
	$\lambda_{\text{激发}} / \lambda_{\text{发射}}$	荧光强度	$\lambda_{\text{激发}} / \lambda_{\text{发射}}$	荧光强度	$\lambda_{\text{激发}} / \lambda_{\text{发射}}$	荧光强度	$\lambda_{\text{激发}} / \lambda_{\text{发射}}$	荧光强度	$\lambda_{\text{激发}} / \lambda_{\text{发射}}$	荧光强度
0	230/330	263	225/380	401	245/455	975	250/379	355	250/466	921
1	230/330	52	240/380	364	240/463	1 264	250/380	340	250/465	1 234
3	225/330	126	240/380	446	240/450	1 185	250/380	393	250/466	1 103
5	225/330	105	235/380	456	240/480	1 457	250/380	402	250/471	1 327
15	225/330	246	230/380	343	235/476	1 024	250/380	254	250/506	917
20	225/330	391	225/380	409	235/476	972	250/380	211	250/506	809

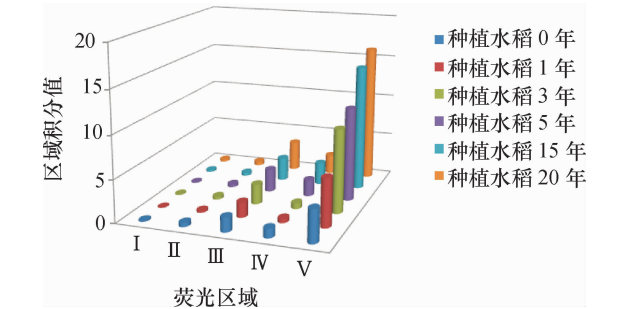
2.4 不同种植年限苏打盐碱型水稻土 WEOM 荧光区域的积分变化特征

为了定量揭示不同种植年限苏打盐碱型水稻土中 WEOM 的差异,用 Matlab 软件分别对 6 种土壤的有机物质组分的荧光值进行区域积分(图 2),并计算各区域的积分值占总积分值的比例(图 3)。从图

2 可以看出,WEOM 的积分值为区域 V > 区域 III > 区域 IV > 区域 II > 区域 I,即在苏打盐碱型水稻土中类腐殖酸 > 类富里酸 > 类溶解性微生物代谢产物 > 类色氨酸蛋白质 > 类酪氨酸蛋白质,并且各区域的积分值随着水稻种植年限的延长而增加。不同种植年限中,水稻土中类腐殖酸物质含量及类富里酸含

量表现为:20 年 > 15 年 > 5 年 > 3 年 > 1 年 > 0 年;类溶解性微生物代谢产物表现为:15 年 > 20 年 > 5 年 > 0 年 > 1 年 > 3 年,这说明,不同种植年限苏打盐碱型水稻土 WEOM 以类腐殖物质、类富里酸和类溶解性微生物代谢产物为主,水稻种植使土壤中类腐殖物质含量增加,土壤熟化度增加。主要原因可能是水稻种植年限不断增加,土壤中作物残体的累积及作物根系分泌的物质对微生物影响逐渐变大,微生物代谢产物逐渐增多,土壤中大量累积结构复杂且芳香度较高的腐殖酸和富里酸,然而结构相对简单的蛋白质类物质累积较少,或者由于其结构相对简单,更容易被微生物分解利用。

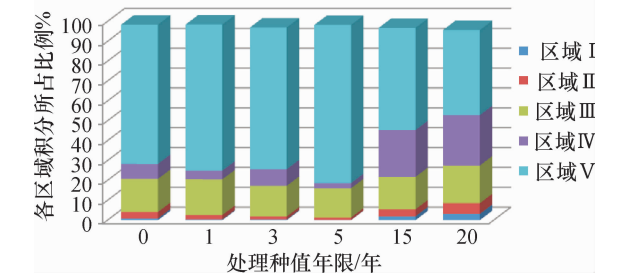
图 3 是各个区域积分占总积分的百分比。从图 3 可以看出,随水稻种植年限区域 I 和区域 II 类蛋白质所占比例最低,区域 III 富里酸所占的百分比没有明显的变化,区域 IV 类溶解性微生物代谢产物越来越多,区域 V 腐殖酸物质所占的比例在降低,种植 20 年土壤中类腐殖酸物质占土壤水溶性有机物质总量的百分比降低,这说明随种植年限增加,土壤中 WEOM 主要来源于微生物的分解代谢活动。



图中区域 I、区域 II、区域 III、区域 IV、区域 V 分别为类酪氨酸蛋白质、类色氨酸蛋白质、类富里酸、类溶解性微生物代谢产物和类腐殖酸。

图 2 不同种植年限苏打盐碱型水稻土水溶性有机物荧光区域积分特征

Fig. 2 The fluorescence regional integration of WEOM in soda saline-alkaline paddy soil with different planting years of rice



图中区域 I、区域 II、区域 III、区域 IV、区域 V 分别为类酪氨酸蛋白质、类色氨酸蛋白质、类富里酸、类溶解性微生物代谢产物和类腐殖酸。

图 3 各区域积分占总积分的比例

Fig. 3 The percentage of region integral against the total

3 讨论与结论

土壤水溶性有机碳是土壤活性有机碳库的重要组成部分^[4],其含量和性质能够反映土壤中有机碳的稳定性^[17],在陆地生态系统碳循环中发挥着重要作用。土壤 WEOM 可用来评价土地利用方式对土壤碳的动态影响,是评价土壤质量的重要指标^[18]。WEOM 是陆地生态系统碳库中的重要组成成分^[19-21]。Christ 等^[22]研究表明,土壤中 WEOM 包括土壤本身的成分和由外部输入的成分,土壤中的生物废弃物、枯草落叶、植物根分泌物和有机物的水解产物,均能影响土壤中的 WEOM 的含量。耿春茂等^[23]研究表明,WEOM 的含量随 pH 的降低而增加。彭志刚等^[24]研究发现,表层土壤中 WEOM 荧光强度比其他层土壤中的大。李明堂等^[25]研究表明,大豆和玉米根部土壤 WEOM 的组成和结构不同,长期施用氮肥可对黑土土壤中 WEOM 的组成和结构产生影响。

本研究结果表明,随种植年限的延长,苏打盐碱型水稻土中土壤有机物含量逐渐增加,增加幅度为 2.6% ~ 64.2%,到种植 20 年时土壤有机质达到了最大值;而土壤 WEOM 的质量分数呈现先增加后逐渐降低的趋势,在种植 3 年时达到最大值 (259.29 mg · kg⁻¹),而在种植 20 年最小,为 19.29 mg · kg⁻¹,WEOM 占总有机质的比例与 WEOM 的变化趋势相同。随着种植年限的增加,苏打盐碱型水稻土中腐殖类物质以及含有不饱和双键的芳香族化合物含量增加,土壤 WEOM 的芳香度增加;不同种植年限苏打盐碱型水稻土中 WEOM 的三维荧光图谱形状和荧光强度不同,随着种植年限的增加,三维荧光强度和密度增加,尤其是区域 III 和区域 V;与不种植水稻的土壤相比,苏打盐碱型水稻种植 20 年土壤中 WEOM 在区域 III 和区域 V 的荧光强度最大,而且可以看到明显的峰值。

在不同种植年限苏打盐碱型水稻土中,区域 I (类酪氨酸蛋白质)和区域 II (类色氨酸蛋白质)荧光峰的发射光波长发生了蓝移,而区域 III 和区域 V 发射光波长发生了红移现象,在腐殖酸浓度增大时,荧光粉会出现明显的红移;经过积分定量分析,不同土壤积分值为区域 V > 区域 III > 区域 IV > 区域 II > 区域 I,即在苏打盐碱型水稻土中类腐殖酸 > 类富里酸 > 类溶解性微生物代谢产物 > 类色氨酸蛋白质 > 类酪氨酸蛋白型,其不同组分占总水溶性有机物质的百分比,随着种植年限的延长而变化,这说明水稻土中 WEOM 的含量和组成受种植的影响,在水稻种植 20 年时,类腐殖物质占水溶性有机物质的百分

比最低,不同土壤中主要以类腐殖酸、类富里酸和类溶解性微生物代谢产物为主,种植增加了土壤中类富里酸和腐殖酸类物质含量,土壤 WEOM 芳香化程度增加。本研究证明三维荧光技术适合土壤中 WEOM 结构和组分的差异研究。

参考文献:

[1] GHANI A, DEXTER M, PERROTT K W. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation [J]. *Soil Biol Biochem*,2003,35(9):1231-1243.

[2] 李书玲,魏丹,周宝库,等. 长期定位施肥黑土水溶性有机物组分组成特性研究[J]. *东北农业大学学报*, 2012,43(2):103-107.

[3] 郝瑞军,李忠佩,车玉萍. 苏南水稻土有机碳矿化特征及其与活性有机碳组分的关系[J]. *长江流域资源与环境*,2010,19(9):1069-1074.

[4] 张金波,宋长春,杨文燕. 小叶章湿地表土水溶性有机碳季节动态变化及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2005,25(10):1397-1402.

[5] LI M T, ZHAO L P, ZHANG J J. Effect of temperature, pH and salt on fluorescent quality of water extractable organic matter in black soil [J]. *J Integr Agr*, 2013, 12(7): 1251-1257.

[6] 黄雪夏,唐晓红,魏朝富,等. 不同利用方式对紫色水稻土水溶性有机碳的影响[J]. *中国农学通报*,2007,23(8): 440-443.

[7] 倪进治,徐建明,谢正苗,等. 不同施肥处理下土壤水溶性有机碳含量及其组成特征的研究[J]. *土壤学报*, 2003,40(5):724-730.

[8] 郝瑞军,李忠佩,车玉萍. 冻融交替对水稻土水溶性有机碳含量及有机碳矿化的影响[J]. *土壤通报*,2007, 38(6):1052-1057.

[9] 刘淑霞,王宇,赵兰坡,等. 冻融作用下黑土有机碳数量变化的研究[J]. *农业环境科学学报*,2008,27(3): 984-990.

[10] 陈涛,杜丽君,郝晓晖,等. 长期施肥对水稻土活性有机碳的影响[J]. *土壤通报*,2009,40(4):809-814.

[11] 张甲坤,陶澍,曹军. 中国东部土壤水溶性有机物荧光特征及地域分异[J]. *地理学报*,2001,56(4):409-416.

[12] 李明堂,王继红,赵兰坡. 大豆与玉米根部土壤水溶性有机的荧光特性比较研究[J]. *水土保持学报*,2013,27(2):140-144.

[13] 赵兰坡,王宇,马晶,等. 吉林省西部苏打盐碱土改良研究[J]. *土壤通报*,2001, 32(S1):92-97.

[14] 张梅,王宇,赵兰坡,等. 苏打盐碱土种稻改良的水资源高效利用田间试验研究[J]. *灌溉排水学报*,2014,32(1):132-134.

[15] WEISHAAR J, AIKEN G, BERGAMASCHI B, et al. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon[J]. *Environ Sci Technol*, 2003,37(20): 4702-4708.

[16] HASSOUNA D L, MASSIANI C, DUDAL Y, et al. Changes in water extractable organic matter(WEOC) in a calcareous soil under field conditions with time and soil depth[J]. *Geoderma*, 2010, 155(1/2):75-85.

[17] ZHAO M X, ZHOU J B, KALBITZ K. Carbon mineralization and properties of water-extractable organic carbon in soil of the south Loess Platrau in China[J]. *Eur J Soil Biol*, 2008,44(2):158-165.

[18] 侯翠翠,宋长春,李英臣,等. 不同水分条件下小叶章湿地表土有机碳及活性有机碳组分季节性动态[J]. *环境科学*,2011,32(1):290-297.

[19] 王艳,杨丽娟,周崇峻,等. 长期施肥对设施蔬菜栽培土壤水溶性有机碳含量及其剖面分布的影响[J]. *中国农学通报*,2010,26(11):178-181.

[20] 毕冉,周顺桂,袁田,等. 水溶性有机物电子转移能力及其生态效应[J]. *应用生态学报*, 2013, 33(1): 45-52.

[21] BIEDERBECK W B, HUNT H W, WOODMANSEE R G, et al. Phoenix, a model of the dynamics of carbon and nitrogen in grassland soils[J]. *Ecol Bull*, 1981, 33: 49-115.

[22] CHRIST M J, DAVID M B. Dynamics of extractable organic carbon in spodosol forest floors [J]. *Soil Biol Biochem*, 1996, 28(9): 1171-1179.

[23] 耿春茂,席北斗,赵越. pH 及离子强度对渗滤液水溶性有机物同步荧光光谱的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2010,41(11):83-86.

[24] 彭志刚,刘晓庆. 不同深度土壤中水溶性有机物荧光光谱特征研究[J]. *现代农业科技*, 2011(5): 272-273.

[25] 李明堂,王继红,赵兴敏,等. 长期施肥对黑土水溶性有机物三维荧光特性的影响[J]. *水土保持学报*,2014,28(3):143-147.

【责任编辑 霍 欢】