

赵海超,王炯琪,李 璠,等. 种植模式对土壤溶解性有机质光谱特征的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(2):232-239.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.02.038

种植模式对土壤溶解性有机质光谱特征的影响

赵海超¹,王炯琪¹,李 璠¹,李艳平²,黄智鸿¹,魏 东¹,卢海博¹

(1. 河北北方学院/河北省农产品食品质量安全分析检测重点实验室,河北张家口 075000; 2. 中国环境科学研究院,北京 100012)

摘要:溶解性有机质(DOM)是土壤中重要的活性有机质组分,对种植模式及人类活动反应敏感。采集冀北坝上 7 种种植模式的农田土壤样本,运行三维荧光结合区域积分(FRI)和紫外光谱对土壤 DOM 进行解析,探讨土壤 DOM 与种植模式的响应关系。结果表明,冀北坝上地区土壤三维荧光光谱均有 5 个区域,其中以类腐殖酸组分($P_{(V,n)}$: 58.95% ~ 69.79%)含量最高,大小顺序为露地菜地 > 大棚菜地 > 草地 > 青贮玉米地 > 燕麦地 > 林地 > 马铃薯地;富里酸组分($P_{(III,n)}$: 17.97% ~ 23.82%)次之,大小顺序为青贮玉米地 > 燕麦地 > 林地 > 草地 > 马铃薯地 > 大棚菜地 > 露地菜地;SUVD_{254 nm}在 0.02 ~ 1.31 之间,青贮玉米地和露地菜地显著高于其他种植模式,草地显著低于其他种植模式。土壤总磷与类富里酸呈显著负相关,与类腐殖酸呈极显著正相关。施用有机肥能增加 DOM 的腐殖化程度、腐熟程度和微生物源特征;增温灌溉等改善土壤环境的措施能增加 DOM 芳香性和陆源特征;施用化肥能增加 DOM 自生源及芳香性;种植饲草作物能增加 DOM 的腐殖化程度和陆源特征;粗放经营能增加土壤 DOM 小分子组分。水源涵养区土壤应增加 DOM 类腐殖酸组分含量,以增加土壤肥力供肥能力,冀北坝上地区农田应增施有机肥,适度灌溉,减小利用强度,扩大饲草作物面积,以增强涵养水肥能力。

关键词:溶解性有机质;种植模式;三维荧光光谱;紫外光谱

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)02-0232-07

土壤溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)作为土壤有机质中最重要、最活跃的组成部分,在土壤一系列生物化学过程中发挥着重要作用^[1-2],同时对施肥、灌溉及作物类型及耕作栽培方式等农艺措施具有敏感反应。近年来土壤 DOM 组分成为土壤有机质研究的热点,国内外有许多学者对土壤 DOM 的组分、结构以及来源进行了大量的研究^[3-4]。随着光谱等技术的发展,紫外光谱、三维荧光光谱、红外光谱、核磁共振、质谱等技术成为现今研究 DOM 组分特征的主要技术手段^[5-6],与其他技术相比较,紫外光谱和三维荧光光谱具有灵敏度高、所用样品量少和监测速度快等优点^[7],广泛用于研究土壤 DOM 的组成、来源和生物地球化学循环^[8-9]。杨威杉等利用三维荧光光谱技术研究表明,气候条件变化对青海草甸土中 DOM 的来源、性

质和组成的差异均有重要影响^[10];梁俭等利用紫外-可见光谱技术,研究三峡库区消落地带土壤 DOM 的释放特征^[11]。结合紫外光谱和三维荧光光谱技术能够更加准确地揭示土壤 DOM 组分的农艺措施响应机制,然而运用多种光谱技术揭示土壤 DOM 对不同种植模式农田的反应研究相对较少。

冀西北坝上地区是我国北方典型的干旱半干旱气候区^[12],作为京津冀主要的水源涵养区,该区域近年来土壤沙化趋势明显,生态农业发展势在必行。土壤 DOM 是有机质中易于迁移的组分,研究其组分特征及其对农田种植模式的响应机制,对于制定该区域农业发展模式具有重要的意义。2000 年来,坝上开始实施大规模的退耕还林还草工程和京津风沙治理工程,该地区植被得到一定恢复^[13]。农田由传统的粗放种植模式为主转变为种植反季节蔬菜等高附加值作物、集约化种植马铃薯和粗放管理的饲草作物等,导致该区域呈现农田、林地、草地并存,温室大棚、不同肥水管理农田、粗放经营农田等种植模式多样化^[14-15],且由于地理及土壤肥力存在空间差异性,不同种植模式长期分化并存。研究冀西北坝上区域不同种植模式下土壤溶解性营养盐的迁移转化规律及机制,有利于明确京津冀水

收稿日期:2021-03-25

基金项目:河北省教育厅重大项目(编号:ZD2019097);河北省现代农业产业技术体系项目(编号:HBCT2018020203);河北省创新能力提升计划(编号:20526401D);河北北方学院博士基金(编号:12995543)。

作者简介:赵海超(1974—),男,内蒙古赤峰人,博士,副教授,主要从事农业生态学研究。E-mail:haichaozhao19@163.com。

源涵养区应采用的农业种植模式,可为保护京津冀水源涵养区、建设沙壤土可持续生态农业种植模式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与土壤采样

研究区域位于河北省张家口坝上地区的张北县(114°75′~115°29′E,41°17′~41°38′N),海拔高度 1 700~2 100 m,年降水量 350~450 mm,年平均日照 2 897.8 h,土壤为栗钙土、沙壤质。根据乔赵崇等的研究^[16],在坝上选择大棚蔬菜地[架豆角(*Vigna unguiculata*)]、露地蔬菜地

[茼蒿(*Asparagus officinalis*)]、马铃薯(*Solanum tuberosum*)地、青贮玉米(*Zea mays*)地、燕麦(*Avena sativa*)地、林地[4~50 树龄杨树(*Populus*)]、草地 7 种植模式农田,各类型地块总体理化指标如表 1 所示。利用前人研究方法^[17]每种模式选择 2 个地块,于 2017 年进行土样采集,每个样地选择 3 个样方,每个样方 4 m²,每个样方按“S”形采集 5 个点,采集 0~20 cm 土壤。现场混匀,去除土壤中杂质置于塑封袋中,带回实验室风干。分成 2 个部分,分别进行土壤 DOM 三维荧光和土壤微生物生物量等理化指标的测定。

表 1 7 种植模式下土壤理化性状

样本	容重 (g/cm ³)	含水率 (%)	总氮含量 (g/kg)	总磷含量 (mg/kg)	有机质含量 (g/kg)	pH 值	铵态氮含量 (mg/kg)	无机磷含量 (mg/kg)
7 种植模式土壤	1.10~1.71	2.18~18.49	0.63~1.17	193.60~841.64	8.97~30.97	7.48~8.31	150.07~337.54	4.11~49.71

1.2 样品分析方法

土壤 DOM 荧光光谱分析,取一定量的土壤,按照土水比 1:10 用 KCl 溶液(1 mol/L)振荡提取(25 ℃、200 r/min、24 h),离心后(5 000 r/min、15 min)过 0.45 μm 玻璃纤维滤膜后获得待测定 DOM 溶液,并将 DOM 溶液稀释 10 倍,以降低内部滤波器效应^[18]。DOM 三维荧光光谱利用 Hitachi F-7000 型荧光光谱分析仪扫描,带通(Bandpass):激发波长 λ_{Ex}=5 nm,发射波长 λ_{Em}=5 nm;扫描速度:2 400 nm/min。三维荧光光谱测定激发波长(Ex)200~440 nm,发射波长(Em)250~600 nm,以 Milli-Q 超纯水作 CK^[19]。

土壤 DOM 紫外光光谱采用岛津 UV-2450 紫外-可见分光光度计进行吸收光谱扫描^[20],取 2 g 土壤样品,以蒸馏水为浸提液,土水比为 1:10;在振荡器上连续振荡 12 h,离心 10 min(4 000 r/min),过 0.45 μm 玻璃纤维滤膜,滤液即为土壤 DOM 储备液^[21]。扫描波长范围为 190~900 nm,扫描波长间隔为 2 nm。SUVD_{254 nm}为 254 nm 的紫外吸光度与溶解性有机碳浓度(dissolved organic carbon,DOC)的比值;*E*₄/*E*₆为 465 nm 和 665 nm 的紫外吸光度之比;*D*_{253 nm}/*D*_{203 nm}为 253 nm 和 203 nm 的紫外吸光度之比^[19-20]。土壤 DOC 采用岛津 TOC-5000A 测定。土壤理化指标采用常规分析法测定。

1.3 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件进行数据分

析,三维荧光光谱特征使用 Matlab 2007 软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 种植模式对土壤溶解性有机质三维荧光光谱特征的影响

2.1.1 不同种植模式下土壤 DOM 三维荧光光谱特征 不同种植模式下土壤 DOM 的三维荧光光谱(EEM)区域积分(fluorescence regional integration, FRI)定量分析如图 1 所示。对 EEM 进行荧光光谱 FRI 定量分析,能对 EEM 的细微变化进行定量区分,进而提高谱图的识别能力^[21-23]。根据 Chen 等的方法^[24],将 EEM 谱图分为 5 个区域:区域 I [*P*_(I,n),Ex/Em=(220~250) nm/(280~330) nm]是络氨酸类蛋白质区;区域 II [*P*_(II,n),Ex/Em=(220~250) nm/(330~380) nm]是色氨酸类蛋白质区;区域 III [*P*_(III,n),Ex/Em=(220~250) nm/(380~550) nm]是类富里酸区;区域 IV [*P*_(IV,n),Ex/Em=(250~400) nm/(280~380) nm]是溶解性微生物代谢产物区;区域 V [*P*_(V,n),Ex/Em=(250~400) nm/(380~550) nm]是类腐殖酸区^[25]。通过 FRI 定量分析,不同种植模式农田土壤 DOM 的 EEM 均可分为 5 个区域,且各农田土壤 DOM 区域存在较大差异。

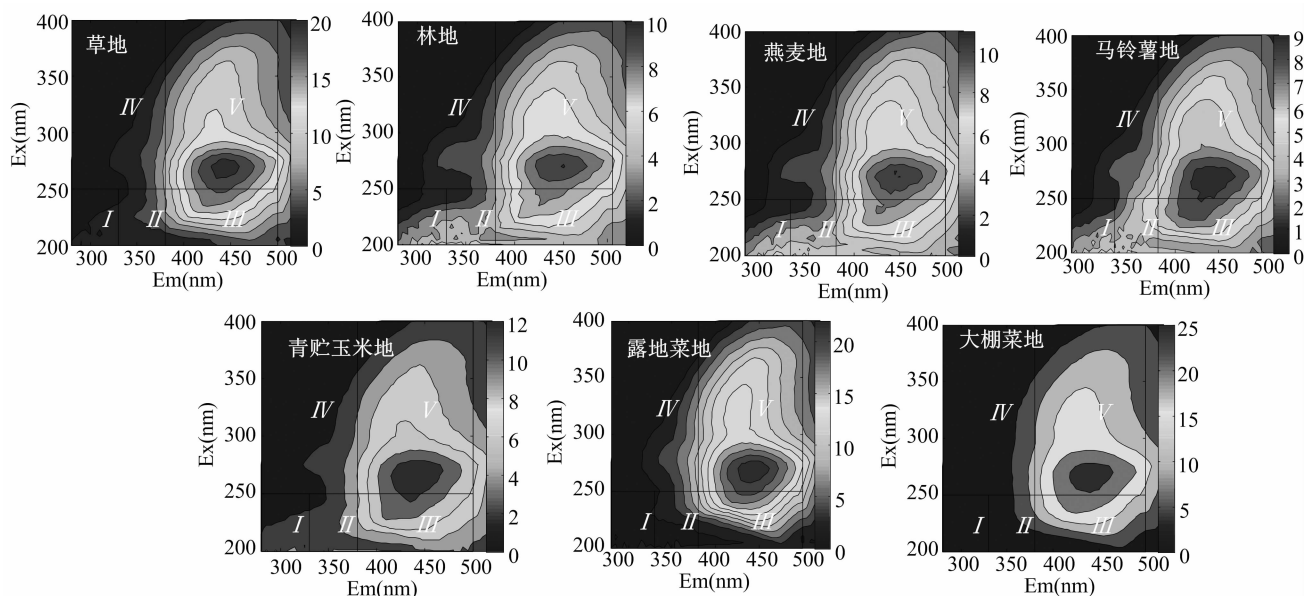


图1 不同种植模式下土壤 DOM 三维荧光图

2.1.2 种植模式对土壤 DOM 组分影响 不同种植模式下土壤 DOM 的组分变化如图 2 所示。土壤 DOM 的 $P_{(I,n)}$ 在 0.94% ~ 4.08% 之间, 大小顺序为燕麦地 > 林地 > 马铃薯地 > 青贮玉米地 > 草地 > 露地菜地 > 大棚菜地。 $P_{(II,n)}$ 在 2.52% ~ 6.68% 之间, 大小顺序为马铃薯地 > 林地 > 燕麦地 > 青贮玉米地 > 草地 > 大棚菜地 > 露地菜地。 $P_{(III,n)}$ 在 17.97% ~ 23.82% 之间, 大小顺序为青贮玉米地 > 燕麦地 > 林地 > 草地 > 马铃薯地 > 大棚菜地 > 露地菜地。 $P_{(IV,n)}$ 在 7.03% ~ 8.64% 之间, 大小顺序为露地菜地 > 马铃薯地 > 林地 > 青贮玉米地 > 大棚菜地 > 草地 > 燕麦地。 $P_{(V,n)}$ 在 58.95% ~ 69.79% 之间, 大小顺序为露地菜地 > 大棚菜地 > 草地 > 青贮玉米地 > 燕麦地 > 林地 > 马铃薯地。可见冀西北坝上地区土壤 DOM 主要以类腐殖酸为主, 其次为类富里酸^[20]。粗放式经营的燕麦地络氨酸蛋白质类组分含量较高, 充分灌溉并大量施用化肥的马铃薯地色氨酸蛋白质类组分含量较高, 归还率较高的青贮玉米地类富里酸组分含量较高, 增施有机肥并充分灌溉的蔬菜地类腐殖酸和溶解性微生物代谢产物组分含量较高, 林地类蛋白组分含量较高, 草地类腐殖酸含量较高。

2.1.3 种植模式对土壤 DOM 三维荧光参数的影响 不同种植模式下土壤 DOM 三维荧光参数如图 3 所示。荧光指数 (fluorescence index, $f_{450\text{ nm}/500\text{ nm}}$) 是激发光波长 370 nm 时, 荧光发射光谱中 450、500 nm 处荧光强度比值, 可用来区别有机质的来

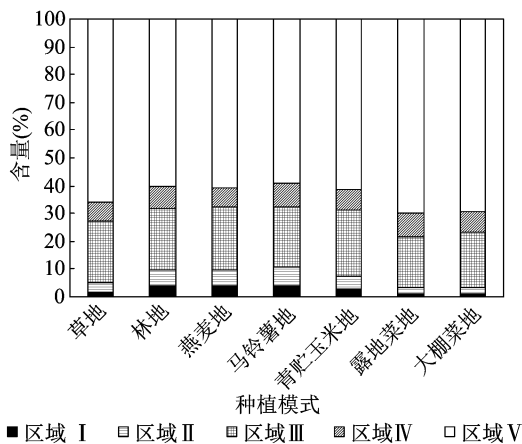


图2 不同种植模式下土壤 DOM 组分特征

源^[25]。可将荧光指数值分为 1.4、1.9, $f_{450\text{ nm}/500\text{ nm}} < 1.4$ 表明来源于外来输入, $f_{450\text{ nm}/500\text{ nm}} > 1.9$ 表明来源于土壤中微生物代谢产物^[26]。一般 $f_{450\text{ nm}/500\text{ nm}}$ 值越高, 溶解性有机质的芳香性越低。不同种植模式农田土壤 DOM 的 $f_{450\text{ nm}/500\text{ nm}}$ 在 1.32 ~ 1.64 之间, 露地菜地最高, 大棚菜地次之, 燕麦地显著低于其他种植模式, 表明增施有机肥和增加农作物的归还率能够增加土壤 DOM 的微生物源, 并使其芳香性降低, 而施用化肥及粗放式经营增加土壤 DOM 外源特性, 并增加其芳香性。自生源指数 (biological index, BIX) 是激发波长 254 nm 下, 发射波长在 380、430 nm 处的荧光强度比值^[20,27], 当 $BIX > 1$ 时, 表明微生物活性强, 自生源特征强; BIX 值在 0.6 ~ 0.7 范围, 表明微生物活性较弱, 陆源特征强^[27]。不同种植模式农田土壤 DOM 的荧光参数 BIX 值在

0.43 ~ 0.62 之间,马铃薯地最高,且显著高于其他种植模式,可见冀西北坝上土壤 DOM 陆源特征较强,特别是粗放式经营将进一步增加土壤 DOM 的陆源特征。腐殖化指数(humification index, HIX)是表征土壤 DOM 的腐殖化程度,当 HIX 小于 4 时,DOM 腐殖化程度较弱;当 HIX 高到 10 ~ 16 时,DOM 具有显著的腐殖质特征,主要为陆源输入^[20-21,28]。

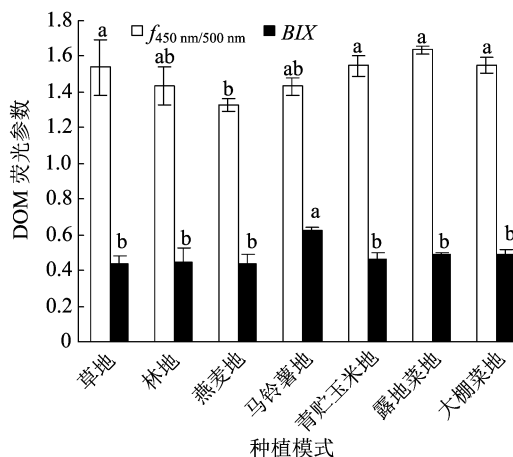
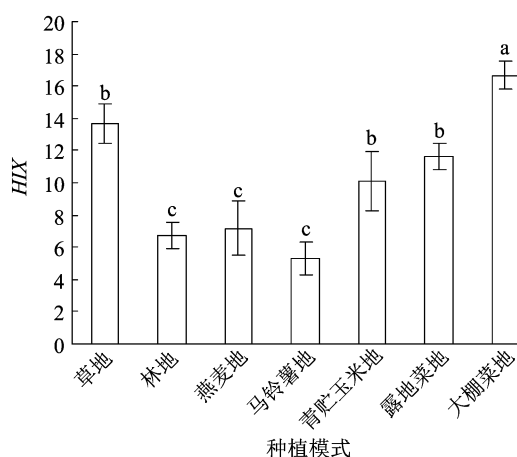


图3 不同种植模式土壤 DOM 三维荧光参数特征

不同种植模式农田土壤 HIX 值在 5.28 ~ 13.65 之间,大棚菜地最高,草地次之,马铃薯地最低,燕麦地、林地和马铃薯地显著低于其他种植模式,可见施用有机肥和种植归还率较高的作物能够明显增加土壤 DOM 腐殖化程度,而施用化肥和粗放经营能够显著降低土壤 DOM 腐殖化程度。



2.2 种植模式对土壤 DOM 紫外光谱特征的影响

不同种植模式下土壤 DOM 紫外光谱参数如图 4 所示。紫外参数 $\text{SUVD}_{254\text{ nm}}$ 是指在 254 nm 波长下的吸光度与 DOC 的比值, $\text{SUVD}_{254\text{ nm}}$ 可以表征 DOM 的腐殖化程度, $\text{SUVD}_{254\text{ nm}}$ 越大, DOM 的腐殖化程度越高^[20,29]。不同种植模式下土壤的 DOM 紫外参数 $\text{SUVD}_{254\text{ nm}}$ 在 0.02 ~ 1.31 之间,青贮玉米地和露地菜地显著高于除大棚菜地外的其他种植模式,草地显著低于其他种植模式,可见施用有机肥和种植归还率较高的作物能够明显增加土壤 DOM 腐殖化程度。紫外参数 E_4/E_6 反映土壤 DOM 腐熟度,不同种植模式下 E_4/E_6 在 4.7 ~ 10.7 之间,大棚菜地和露

地菜地显著高于其他种植模式,燕麦地显著低于其他种植模式,可见增施有机肥能够促进土壤 DOM 腐熟程度,粗放管理降低土壤 DOM 腐熟程度。紫外参数 $D_{253\text{ nm}}/D_{203\text{ nm}}$ 比值较小时,取代基主要是由不可取代的芳香环构成;比值越大,DOM 的芳香性则越小,芳环取代基中的羧基、羰基、羟基、脂肪含量较高^[20,30]。不同种植模式下土壤的 DOM 紫外参数 $D_{253\text{ nm}}/D_{203\text{ nm}}$ 在 0.10 ~ 0.45 之间,燕麦地显著高于其他种植模式,大棚菜地和露地菜地显著低于其他种植模式。可见粗放式经营使土壤 DOM 芳环上的取代基中的羧基、羟基、羰基、脂肪含量较高,施用有机肥充分灌溉增加土壤 DOM 的芳香性。

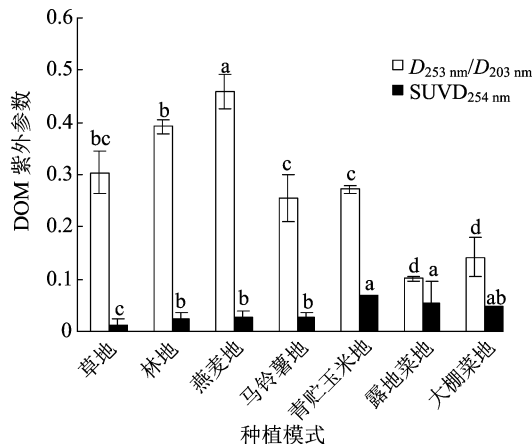
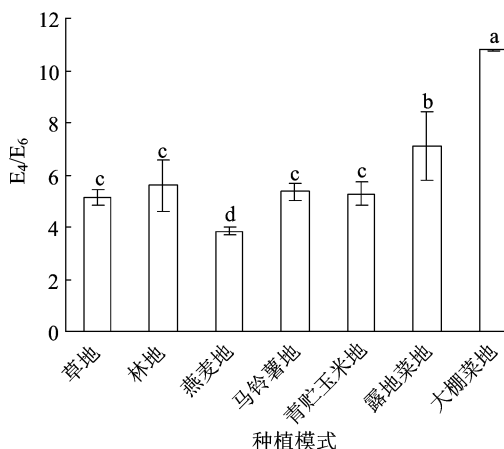


图4 不同土地利用土壤 DOM 紫外光谱特征



3 讨论

3.1 土壤 DOM 光谱特征对土壤肥力的响应

DOM 是土壤中较为活跃的有机质组分,既能够被生物降解成为无机物被生物所利用,其中小分子 DOM 又能够被植物直接吸收利用^[29]。DOM 组分转化及其降解既是土壤养分转化的关键环节,也是反映土壤养分释放的关键过程,同时由于 DOM 易溶于水,因此其迁移规律又能够反映土壤养分的迁移规律。根据土壤 DOM 与土壤养分间的相关性分析(表 2),土壤类富里酸与总氮、总磷和活性磷均呈显著或极显著负相关,络氨酸蛋白和色氨酸类蛋白组分与总磷呈极显著负相关,类腐殖酸与总磷呈极显著正相关。表明随着土壤总磷含量的增加,土壤 DOM 中富里酸、类蛋白等小分子组分含量降低,而土壤 DOM 类腐殖酸大分子组分含量增加,即土壤总磷主要分布在大分子 DOM 组分中,土壤中小分

子 DOM 中的磷易于被生物吸收利用;随着总氮的增加,DOM 中类富里酸含量降低,该区域土壤 DOM 组分对磷素的影响大于氮素,特别是 DOM 有利于促进活性磷迁移转化,因此大量施用有机肥的蔬菜田土壤中 DOM 类腐殖酸组分含量较高,大量施用化肥的马铃薯田土壤中 DOM 类富里酸组分含量较低。根据荧光参数、紫外参数与土壤养分间的相关性分析,HIX 与总磷呈极显著性正相关, E_4/E_6 与总有机碳和总磷呈极显著、显著正相关, $D_{253\text{ nm}}/D_{203\text{ nm}}$ 与总磷和活性磷呈显著性负相关。表明随着土壤磷含量的增加,DOM 腐殖化程度、腐熟程度和芳香性增加,即土壤中磷素特别是活性磷的增加使土壤中 DOM 稳定性增强,可见 DOM 能够较好地固定磷素,大分子 DOM 降低磷素的迁移转化。因此冀西北坝上地区应该采用增加土壤大分子 DOM 的种植模式,以提高和保持土壤肥力。

表 2 土壤 DOM 光谱特征与营养盐相关性分析

光谱特征	相关系数						
	总氮	总有机碳	总磷	溶解性无机磷	溶解性有机磷	铵态氮	活性有机质
Region I	-0.687	-0.624	-0.960 **	-0.637	-0.590	-0.440	0.214
Region II	-0.559	-0.544	-0.922 **	-0.581	-0.500	-0.583	0.309
Region III	-0.836 *	-0.602	-0.818 *	-0.906 **	-0.271	-0.574	0.442
Region IV	0.360	-0.013	0.128	0.717	-0.068	-0.055	-0.045
Region V	0.732	0.660	0.976 **	0.703	0.493	0.613	-0.364
$f_{450\text{ nm}/500\text{ nm}}$	0.431	0.299	0.749	0.663	0.479	0.245	0.021
BIX	0.369	0.163	-0.049	0.340	-0.118	-0.367	0.199
HIX	0.538	0.692	0.882 **	0.335	0.481	0.503	-0.102
SUVD _{254 nm}	-0.088	-0.012	0.289	0.457	-0.358	0.460	-0.101
DOC	-0.198	-0.209	-0.484	-0.609	0.196	-0.428	0.176
E_4/E_6	0.643	0.900 **	0.814 *	0.491	-0.014	0.694	0.114
$D_{253\text{ nm}}/D_{203\text{ nm}}$	-0.703	-0.569	-0.819 *	-0.847 *	-0.267	-0.352	0.071

注:n=7,* 为显著相关($P<0.05$),** 为极显著相关($P<0.01$)。

土壤微生物及酶活性能够反映农田土壤的供肥能力^[31],而土壤微生物又是 DOM 的主要来源。根据乔赵崇等的研究^[31],冀北坝上地区土壤 DOM 光谱特征与微生物量碳氮磷及酶活性间相关性分析如表 3 所示。络氨酸蛋白和色氨酸类蛋白组分与蔗糖酶(sucrase,SUC)活性和微生物量碳呈显著负相关,与脲酶(urease,URE)活性呈极显著负相关;类富里酸组分与微生物量碳氮比呈显著负相关;类腐殖酸组分与蔗糖酶活性和微生物量碳(microbial biomass carbon,MBC)呈显著正相关,与脲酶活性呈极显著正相关。可见土壤 DOM 类腐殖酸组分含量

越高,蔗糖酶和脲酶活性越强,而类蛋白组分含量高则会抑制蔗糖酶和脲酶活性。脲酶是反映土壤氮素可利用性的主要酶类^[32],蔗糖酶是反映土壤生物活性的主要酶类^[33],脲酶和蔗糖酶主要是降解土壤 DOM 小中类蛋白组分。土壤 DOM 荧光参数 $f_{450\text{ nm}/500\text{ nm}}$ 与蔗糖酶、脲酶活性呈显著正相关;HIX 与脲酶活性呈显著正相关,与微生物量碳呈极显著正相关;土壤 DOM 紫外参数 E_4/E_6 与微生物量碳呈显著正相关。可见随着土壤酶活性的增强,微生物源 DOM 增加;随着土壤 DOM 腐熟程度和芳香性的增加,土壤中微生物的生物量增加。表明土壤 DOM

类腐殖酸含量的增加提高了土壤酶活性及微生物生物量,进而促进土壤养分转化,而土壤 DOM 小分子类蛋白组分则被微生物降解转化。

表 3 土壤 DOM 光谱特征与酶活性及微生物量相关性分析

光谱特征	相关系数					
	蔗糖酶活性	脲酶活性	微生物量氮	微生物量磷	微生物量碳	微生物量碳氮比 MBC/N
Region I	-0.771 0 *	-0.875 2 **	-0.413 8	0.087 3	-0.754 1 *	-0.316 9
Region II	-0.753 1 *	-0.844 6 **	-0.374 6	0.073 3	-0.713 1 *	-0.370 7
Region III	-0.608 4	-0.663 4	0.260 4	0.549 2	-0.491 5	-0.818 5 *
Region IV	0.255 4	0.090 7	-0.524 4	-0.358 2	-0.267 2	0.598 5
Region V	0.745 8 *	0.860 4 **	0.229 3	-0.242 7	0.751 8 *	0.505 6
$f_{450\text{ nm}/500\text{ nm}}$	0.850 5 **	0.744 5 *	0.365 6	0.133 7	0.445 5	0.280 1
BIX	-0.155 4	-0.215 7	-0.233 6	-0.257 2	-0.172 5	0.048 5
HIX	0.634 0	0.735 9 *	0.651 9	0.100 0	0.866 2 **	0.020 9
SUVD _{254 nm}	0.183 4	-0.028 9	0.324 2	0.187 4	-0.094 4	0.060 0
DOC	-0.213 6	-0.117 6	-0.353 8	-0.019 6	-0.075 3	-0.108 5
E_4/E_6	0.564 7	0.390 5	0.473 1	0.072 2	0.802 7 *	0.094 4
$D_{253\text{ nm}}/D_{203\text{ nm}}$	-0.659 8	-0.586 1	-0.227 5	0.140 4	-0.480 3	-0.375 6

3.2 土壤 DOM 光谱特征对种植模式的响应机制

种植模式是人类对农田的管理方式,通过人类干扰及外源输入对农田土壤理化环境产生影响,进而达到农作物高产高效的目标。土壤中 DOM 是活跃的有机质组分,对人类扰动和外源输入较为敏感。冀西北坝上地区土壤以沙壤土为主,其理化性状对种植模式的反应更加敏感。与残存草地土壤相比,设施农业大棚菜地通过改善土壤环境,增施肥料和充分灌溉,增加土壤氮磷有机质含量,提高土壤微生物量及酶活性,从而增加土壤 DOM 类腐殖酸和微生物产物组分含量^[34];露地菜地通过施用有机肥和灌溉,使土壤 DOM 类腐殖酸和微生物产物组分含量增加^[34],但与大棚菜地相比,由于不能提高土壤温度等气候环境,土壤微生物及酶活性略低,土壤 DOM 降解能力减弱,土壤 DOM 色氨酸和类富里酸组分含量降低,类腐殖酸和微生物代谢产物含量增加,可见改善农田环境增加温度可促进土壤中 DOM 大分子组分降解;大量施用化肥并充分灌溉的马铃薯地,增加了土壤氮磷含量,土壤扰动频率高,土壤通气性好,提高了土壤微生物活性,加快土壤有机物降解,使土壤 DOM 类蛋白和微生物产物含量增加,类富里酸和类腐殖酸组分含量降低,增加了 DOM 自生源及芳香性;青贮玉米地及林地根系发达,作物对有机物降解作用较强,土壤 DOM 类腐殖酸组分含量降低;粗放经营的燕麦地以保护土壤、恢复地力为主,对土壤扰动较少,土壤 DOM 类蛋白和类富里酸组分含量明显增加。总体

来看,施用有机肥和作物残落物,能够增加 DOM 类腐殖酸组分和微生物产物含量,增加 DOM 的腐殖化程度、腐熟程度和微生物源特征,降低芳香性;增施化肥可增加 DOM 小分子组分和微生物产物含量,增加 DOM 自生源及芳香性;灌溉能够增加 DOM 微生物产物含量,促进 DOM 芳环的降解,增强 DOM 的腐熟程度;粗放经营使土壤 DOM 小分子组分增加,降低 DOM 的腐殖化程度、腐熟程度,改善农田环境、增加温度可促进土壤中 DOM 降解,降低腐熟程度,增加芳香性,增加陆源特征。得出结论,农田土壤在加大利用强度时,使 DOM 小分子组分含量增加;而在保护性耕作过程中使 DOM 大分子组分含量增加。因此冀西北坝上地区作为京津冀水源涵养区,应降低土壤小分子 DOM 含量,增加类腐殖酸组分,降低面源污染,增施有机肥,适度灌溉,减小利用强度,扩大种植饲草作物面积,以保持土壤肥力及增强保肥能力,提高水源涵养区生态效益。

4 结论

冀西北坝上不同种植模式下土壤 DOM 的三维荧光光谱在不同区域存在较大的差异,土壤 DOM 以类腐殖酸组分为主, $P_{(V,n)}$ 在 58.95% ~ 69.79% 之间,大小顺序为露地菜地 > 大棚菜地 > 草地 > 青贮玉米地 > 燕麦地 > 林地 > 马铃薯地;其次为类富里酸组分, $P_{(III,n)}$ 在 17.97% ~ 23.82% 之间,大小顺序为青贮玉米地 > 燕麦地 > 林地 > 草地 > 马铃薯地 > 大棚菜地 > 露地菜地。

通过不同种植模式下土壤 DOM 三维荧光光谱和紫外光谱特征可知,施用有机肥能增加 DOM 的腐殖化程度、腐熟程度和微生物源特征;增温灌溉等改善土壤环境措施能增加 DOM 芳香性和陆源特征;施用化肥能增加 DOM 自生源及芳香性;种植饲草作物能增加土壤 DOM 小分子组分,增加 DOM 的腐殖化程度和陆源特征。

土壤 DOM 的光谱特征能够指示土壤供肥能力,随着土壤 DOM 类腐殖酸组分含量的增加,土壤供肥能力增强,保肥能力增加。冀西北坝上地区欲增强水源涵养区生态功能,农田应增施有机肥,适度灌溉,减小利用强度,扩大种植饲草作物面积。

参考文献:

- [1] Zsolnay Á. Dissolved organic matter: artefacts, definitions, and functions[J]. *Geoderma*, 2003, 113(3/4): 187 – 209.
- [2] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 49 – 56.
- [3] He X S, Xi B D, Wei Z M, et al. Fluorescence excitation – emission matrix spectroscopy with regional integration analysis for characterizing composition and transformation of dissolved organic matter in landfill leachates[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 190(1/2/3): 293 – 299.
- [4] Bhattacharya R, Osburn C L. Spatial patterns in dissolved organic matter composition controlled by watershed characteristics in a coastal river network: the Neuse River Basin, USA[J]. *Water Research*, 2020, 169: 115248.
- [5] Kaal J, Cortizas A M, Biester H. Downstream changes in molecular composition of DOM along a headwater stream in the Harz mountains (Central Germany) as determined by FTIR, Pyrolysis – GC – MS and THM – GC – MS[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2017, 126: 50 – 61.
- [6] Gu N T, Song Q B, Yang X L, et al. Fluorescence characteristics and biodegradability of dissolved organic matter (DOM) leached from non – point sources in southeastern China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 258: 113807.
- [7] Li Y P, Wang S R, Zhang L. Composition, source characteristic and indication of eutrophication of dissolved organic matter in the sediments of Erhai Lake[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(5): 3739 – 3751.
- [8] 范春辉, 常敏, 张颖超. 泾渭河交汇区域平水期水体和表层沉积物溶解性有机质的光谱性质[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(9): 2863 – 2869.
- [9] 翟天恩, 霍守亮, 张靖天. 沉积物中溶解性有机质的垂直分布光谱特性[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(11): 6196 – 6204.
- [10] 杨威杉, 李猛, 孙笑蕾, 等. 不同海拔下青海草甸土中溶解性有机质的荧光光谱特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(5): 1477 – 1482.

- [11] 梁俭, 江韬, 卢松, 等. 淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 紫外 – 可见吸收光谱[J]. *环境科学*, 2016, 37(7): 2496 – 2505.
- [12] 代士良. 康保县土地利用与土壤侵蚀关系研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
- [13] 刘正恩. 河北坝上生态退化现状、原因及对策措施[J]. *生态经济*, 2010, 26(1): 166 – 169.
- [14] 王石英, 蔡强国, 吴淑安. 中国北方农牧交错区研究展望[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(4): 138 – 142.
- [15] 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2002, 32(12): 1031 – 1040.
- [16] 乔赵崇, 王炯琪, 赵海超, 等. 种植模式对冀西北坝上土壤活性有机质和碳库管理指数的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(6): 1139 – 1146.
- [17] 连玉珍, 栗慧江, 韩晓浩, 等. 土地利用方式对巴宜区土壤有机碳、氮含量及分布的影响[J]. *高原农业*, 2019, 3(4): 390 – 398.
- [18] Burdige D J, Kline S W, Chen W H. Fluorescent dissolved organic matter in marine sediment pore waters[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 89(1/2/3/4): 289 – 311.
- [19] 王圣瑞. 湖泊沉积物 – 水界面过程: 基本理论与常用测定方法[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [20] 李瑞鑫. 不同农艺措施对冀北坝上土壤溶解性有机质组分特征的影响[D]. 张家口: 河北北方学院, 2019.
- [21] 武佳颖, 武敏桦, 闫静琪, 等. 春玉米覆膜对土壤溶解性有机质光谱特征的影响[J]. *河北北方学院学报(自然科学版)*, 2020, 36(11): 27 – 33, 44.
- [22] 李艳平, 王圣瑞, 赵海超, 等. 洱海水 – 陆界面溶解性有机氮组成结构及生物有效性——以永安江为例[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(4): 1189 – 1197.
- [23] 吴华勇, 周泽宇, 王洪涛, 等. 光谱校正对溶解有机物三维荧光光谱特征影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(11): 3044 – 3048.
- [24] Quideau S A, Chadwick O A, Trumbore S E, et al. Vegetation control on soil organic matter dynamics[J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32(2): 247 – 252.
- [25] Wolfe A P, Kaushal S S, Fulton J R, et al. Spectrofluorescence of sediment humic substances and historical changes of lacustrine organic matter provenance in response to atmospheric nutrient enrichment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(15): 3217 – 3223.
- [26] McKnight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, et al. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity[J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(1): 38 – 48.
- [27] Huguet A, Vacher L, Relexans S, et al. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary[J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(6): 706 – 719.
- [28] 肖隆庚, 陈文松, 陈国丰, 等. 中国南海 CDOM 三维荧光光谱特征研究[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(1): 160 – 167.

池彬彬,倪莹,陈慧英,等. 1 株产果胶酶中度嗜盐菌(*Aspergillus aculeatus* GLUT-01)的鉴定及产酶条件优化[J]. 江苏农业科学,2022,50(2):239-246.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.02.039

1 株产果胶酶中度嗜盐菌(*Aspergillus aculeatus* GLUT-01)的鉴定及产酶条件优化

池彬彬,倪莹,陈慧英,刘红艳

(桂林理工大学化学与生物工程学院,广西桂林 541004)

摘要:从海拔 2 500 ~ 3 000 m 处的盐井土壤样品中分离得到 1 株中度嗜盐菌,通过对该菌株的菌落形态观察、rDNA-ITS 测序及同源序列比对,构建系统发育树,鉴定该菌株为曲霉属(*Aspergillus*),命名为棘孢曲霉(*Aspergillus aculeatus*) GLUT-01。该菌株能在 3% ~ 15% NaCl (最适 7%)、20 ~ 30 ℃ (最适 27 ℃)、pH 值为 4.0 ~ 10.0 (最适 pH 值为 7.0)条件下生长,且能以部分污染物作为唯一碳源生长,这显示了一定的应用潜力。以其作为发酵真菌进行液态发酵培养,通过正交试验分析,在接种量为 2%,温度为 28 ℃,起始 pH 值为 6,C/N 为 1:2 条件下培养 3 ~ 5 d,产生的果胶酶活性达到 126.68 U/mL。试验结果丰富了嗜盐果胶酶的研究和开发依据,为高盐环境下食品工业加工提供了理论基础。

关键词:中度嗜盐菌;曲霉属;系统发育树;果胶酶;正交试验;产酶条件优化

中图分类号:S182 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)02-0239-08

自然界中存在各种各样的盐域环境如盐湖、盐井、盐矿,也有人工合成的盐土环境如盐场、盐池等,而嗜盐菌(halophiles)则是在这样的高盐环境下能够生长的一类微生物,另外盐制发酵食品中也能够分离筛选出嗜盐菌^[1-2]。与其他极端微生物相比,中度嗜盐菌可以在较高浓度(3% ~ 15%)的盐溶液下生存^[3],并且能利用不同种类的有机物作为

碳源和氮源。因其独特的生理生化特性,确定了其在生产酶制剂、食品行业、污水净化等方面具有非常广阔的应用价值^[4-5]。

果胶酶(pectinase)是世界四大酶制剂之一,是分解果胶质酶类的总称,主要包括原果胶酶、果胶酯酶、聚半乳糖醛酸酶和果胶裂解酶四大类^[6]。主要来源于动植物及微生物,尤其是微生物,因其生长速度快、生长条件简单、代谢过程特殊等特征,成为果胶酶的重要来源^[7]。目前,曲霉属的菌株已被广泛用于聚半乳糖醛酸酶的工业生产^[8]。国内果胶酶需求量很大^[9],但我国果胶酶发展速度缓慢,并且果胶酶大多都是单独使用,这在很大程度上限制了果胶酶的应用范围。因此,为了提高果胶酶制剂的质量,降低成本,选择适合工业化生产的高产果胶酶生产菌是关键^[10-11]。

目前,多数果胶酶在高浓度盐溶液下存在酶活

收稿日期:2021-04-12

基金项目:国家自然科学基金(编号:21762015,31860251);桂林理工大学科研启动基金(编号:GLUT2015038);广西自然科学基金面上项目(编号:2020GXNSFAA238037)。

作者简介:池彬彬(1997—),男,浙江温州人,硕士研究生,研究方向为微生物学。E-mail:837282401@qq.com。

通信作者:陈慧英,博士,副教授,主要从事微生物代谢产物开发,E-mail:hychen@glut.edu.cn;刘红艳,博士,副教授,主要从事功能微生物开发及应用,E-mail:lhyglite@126.com。

[29]高洁,江韬,李璐璐,等. 三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征[J]. 环境科学,2015,36(1):151-162.

[30]谢理,杨浩,渠晓霞,等. 滇池典型陆生和水生植物溶解性有机质组分的光谱分析[J]. 环境科学研究,2013,26(1):72-79.

[31]乔赵崇,赵海超,黄智鸿,等. 冀北坝上不同土地利用对土壤微生物量碳氮磷及酶活性的影响[J]. 生态环境学报,2019,28(3):498-505.

[32]李亚娟,刘静,徐长林,等. 不同退化程度对高寒草甸土壤无机氮及脲酶活性的影响[J]. 草业学报,2018,27(10):45-53.

[33]蒋永梅,师尚礼,田永亮,等. 高寒草地不同退化程度下土壤微生物及土壤酶活性变化特征[J]. 水土保持学报,2017,31(3):244-249.

[34]谢军,赵亚南,陈轩敬,等. 长期不同施肥对土壤溶解性有机质含量及其结构特征的影响[J]. 光谱学与光谱分析,2018,38(7):2250-2255.